

Strahlungsangebot, Strahlungsgenuss
und Photosynthese
nicht ebener Blattflächen
in Abhängigkeit vom Tagesgang der Sonne

INAUGURAL-DISSERTATION

zur Erlangung der Philosophischen Doktorwürde vorgelegt der
Philosophischen Fakultät II der Universität Zürich

von
Barbara Marie-Therese Flach
aus Basel

Begutachtet von den Herren
PD Dr. B.M. Eller
Prof. Dr. Ph. Matile

Zürich 1986

ADAG Administration & Druck AG

Strahlungsangebot, Strahlungsgenuss
und Photosynthese
nicht ebener Blattflächen
in Abhängigkeit vom Tagesgang der Sonne

INAUGURAL-DISSERTATION

zur Erlangung der Philosophischen Doktorwürde vorgelegt der
Philosophischen Fakultät II der Universität Zürich

von
Barbara Marie-Therese Flach
aus Basel

Begutachtet von den Herren
PD Dr. B.M. Eller
Prof. Dr. Ph. Matile

Zürich 1986

ADAG Administration & Druck AG



Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41507227_0003

INHALTSVERZEICHNIS

I. VORWORT	1
II. PROBLEMKREIS UND PROBLEMSTELLUNG	3
III. DAS RECHENPROGRAMM SOL	9
1. Konzept	9
2. Aufbau des Rechenprogramms SOL und Benützungshinweise	11
3. Berechnungsgrundlagen	23
1. Extraterrestrisches Spektrum der solaren Bestrahlungsstärke und spektrale Auflösung der Berechnungen	23
2. Berechnung der Zenitdistanz, des Azimuts und der Zeitpunkte der Kulmination, des Aufgangs und Untergangs der Sonne	27
3. Berechnung der äquivalenten Absorberbeträge für jede Schicht des Atmosphärenmodells	29
4. Berechnung des Winkels zwischen der Normalen der Empfängerfläche und der Richtung zur Sonne	30
5. Unterprogramm VIA zur Berechnung der totalen äquivalenten Absorberbeträge entlang eines Atmosphärenweges	31
6. Berechnung der Himmelsstrahlung	33
7. Ermittlung der Transmissionskoeffizienten	41
8. Cosinuskorrektur der direkten Sonnenstrahlung und Integration der Himmelsstrahlung	42
9. Berechnung der reflektierten Strahlung	44
10. Integration der Wellenlängenbereiche, Berechnung der Quanten, zeitliche Integration und Berechnung der transmittierten und absorbierten Strahlung	45
4. Vergleiche von Messungen und Berechnungen	47
1. Spektrale Verteilungen und PAR - Anteil am gesamten Spektrum	47
2. Tagesgang der Globalstrahlung und Abhängigkeit der Himmelsstrahlung von der Sonnenzenitdistanz	53
3. Globalstrahlung auf geneigte Flächen	59
4. Diffuse Strahlung und Reflexionsanteil geneigter Flächen	62
5. Anwendungsbeispiel: Strahlungsgenuss junger und älterer Blätter von Aloe dichotoma	64

5. Diskussion	75
IV. STRAHLUNGSGENUSS UND PHOTOSYNTHESE NICHT-EBENER BLÄTTER	77
1. Problemstellung	77
2. Material und Methoden	80
1. Versuchspflanzen: Auswahlkriterien und Anzucht	80
2. Bestimmung der Bestrahlungsstärke und des Strahlungsgenusses	81
1. Messung der einfallenden Strahlung	81
2. Die nachführbare Gaswechselküvette	81
3. Optische Eigenschaften der Blätter und Transmissionseigenschaften von Plexiglas	83
4. Bestimmung der Blattkrümmung, der Orien- tierung des eben ausgelegten Blattes und der Blattfläche	85
5. Beschattungen des Blattes und Horizont- einengungen	88
3. Gaswechsellmessung	89
1. Aufbau der Messanlage	89
2. Datenerfassung und Auswertung	92
3. Messung und mathematische Beschreibung der Sättigungskurve	94
4. Zur Durchführung der Messungen	96
3. Ergebnisse	97
1. Blatteinteilungen in Teilflächen und optische Eigenschaften der Blätter	97
2. Sättigungskurven	104
3. Gemessene und berechnete Photosyntheseraten der nicht-ebenen Blätter	110
4. Gegenüberstellung der Photosyntheseraten und Bestrahlungsstärken der nicht-ebenen Blätter mit ebenen derselben Mittelrippenstellung im Tagesgang	111
4. Diskussion und Schlussfolgerungen	122
V. ZUSAMMENFASSUNG	127
VI. ANHANG: LISTE DER PROGRAMMANWEISUNGEN DES RECHEN- PROGRAMMS SOL	129
VII. LITERATURVERZEICHNIS	141

I. VORWORT

Gegen Ende meines Physikstudiums an der Universität Basel sah ich mich nach einer Möglichkeit um, dieses Studium nach dem Diplom mit einem anderen naturwissenschaftlichen Fach zu verbinden. Durch die Begegnung mit Herrn PD Dr. B.M. Eller, dem Leiter der Arbeitsgruppe "Ökophysiologie der Pflanzen" vom Institut für Pflanzenbiologie der Universität Zürich, der die vorliegende Arbeit anregte, bot sich mir die Gelegenheit, diesen Wunsch durch Ausarbeitung einer Dissertation in idealer Weise zu erfüllen. In einer ersten Phase, während der Beschäftigung mit den Berechnungsmöglichkeiten der Globalstrahlung, konnte ich mich von der physikalischen Seite her an die Problematik der Pflanzen und ihrer Umgebungsbedingungen herantasten. Im zweiten, ökophysiologischen Teil der Arbeit, ergab sich dann, im Zusammenhang mit den Gaswechselfmessungen zur Bestimmung der Photosyntheseleistung nicht-ebener Blätter, die direkte Auseinandersetzung mit ökophysiologischen Fragestellungen.

Bei Herrn PD Dr. B.M. Eller möchte ich mich ganz besonders für die Ermöglichung dieser Arbeit bedanken. Meinen herzlichen Dank möchte ich ihm auch aussprechen für die ständige Betreuung der Arbeit und die fachlichen und methodischen Ratschläge. Ebenso bedanke ich mich bei ihm für die hervorragende Entwerfung und Planung zur Konstruktion des Koordinatentisches, der die exakte Messung der Globalstrahlung auf geneigte Flächen ermöglichte, zur Konstruktion der der Sonne nachführbaren Gaswechselfküvette und des Blattasters für die Ausmessung der nicht-ebenen Blattflächen.

Herrn Prof. Dr. H. Wanner und Herrn Prof. Dr. P. Matile danke ich für die entgegenkommende und wohlwollende Unterstützung dieser Arbeit. Die Mitarbeiter der mechanischen Werkstatt des Institutes unter der Leitung von Herrn W. Müller führten die erwähnten Konstruktionen in vorzüglicher Weise aus. Sie waren zudem des öfters bei grösseren und kleineren Schwierigkeiten behilflich. Ich möchte mich dafür ganz herzlich bedanken. Mein Dank gilt auch Herrn Dr. W. Egger, der mir verschiedene photographische Kopien und schwarz-weiss Negative und Positive von Dia-Bildern herstellte. Ein herzliches Dankeschön sage ich auch allen meinen Kollegen, Kolleginnen, Verwandten und Bekannten für die grosse Geduld, die sie mir gegenüber zeigten. Dies gilt insbesondere für

Herrn W. Mann, der mir auch mit zahlreichen Ratschlägen und textverarbeitendem Computer behilflich war.

Die vorliegende Arbeit entstand im Zusammenhang mit den Forschungsprojekten 3.438-0.78 und 3.227-0.82 des Schweizerischen Nationalfonds, welcher einen Teil der eingesetzten Messeinrichtungen und Geräte finanzierte.

II. PROBLEMKREIS UND PROBLEMSTELLUNG

Die Wirkung der auf pflanzliche Oberflächen auftreffenden Strahlung ist für das Leben der autotrophen Pflanzen von erstrangiger Bedeutung. Von den Pflanzen wird entsprechend ihren Absorptionseigenschaften ein Teil dieser auftreffenden Strahlung absorbiert. Nach Ross (1975) kann die Wirkung der absorbierten Strahlung auf die Pflanzen in drei Kategorien unterteilt werden:

- thermische Wirkung (mehr als 70 % der absorbierten Strahlung)
- photosynthetische Wirkung (bis 28 % der absorbierten Strahlung in Energieeinheiten)
- photomorphogenetische Effekte.

Untersucht man die Energiebilanz einer Pflanze, so zeigt es sich, dass die erste der drei genannten Auswirkungen als Hauptkomponente in Erscheinung tritt. Für ein einzelnes Blatt lässt sich die Energiebilanz nach Eller (1971), unter Weglassung der in den meisten Fällen geringen Beiträge der Wärme aus dem Stoffwechsel, der Bilanz aus Wärmespeicherung und -entspeicherung, sowie der Bilanz aus Wärmetransportvorgängen, durch die Gleichung

$$Q = e_R \cdot R_B + C + T \quad (\text{II.1})$$

mit Q = absorbierte Totalstrahlung

R_B = Schwarzkörperstrahlung entsprechend der Blattemperatur

e_R = mittlerer Emmissionsgrad des Blattes für thermische Strahlung

C = Konvektionswärme

T = Transpirationswärme

darstellen.

Die absorbierte Totalstrahlung Q besteht aus zwei wellenlängenmässig voneinander trennbaren Anteilen und lässt sich deshalb durch die Summe

$$Q = a_G \cdot G + a_R \cdot R_{AU} \quad (II.2)$$

mit G = Globalstrahlung im Wellenlängenbereich
300 - 3000 nm

a_G = mittlerer Absorptionsgrad des Blattes
für die Globalstrahlung

R_{AU} = thermische Strahlung der Atmosphäre
und der Umgebung mit Wellenlängen
grösser als 3000 nm

a_R = mittlerer Absorptionsgrad des Blattes
für thermische Strahlung

beschreiben. Subtrahiert man von Gleichung (II.1) die thermische Eigenstrahlung $a_R \cdot R_B$ des Blattes ($\epsilon_R = a_R$ nach Kirchhoffschem Gesetz), so ergibt sich seine Strahlungsbilanz zu

$$Q - a_R \cdot R_B = a_G \cdot G + a_R \cdot (R_{AU} - R_B). \quad (II.3)$$

Betrachtet man das Verhalten der Strahlungsbilanz im Tagesgang, so zeigt sich, dass die absorbierte Globalstrahlung Q die dominierende Variable im ganzen Geschehen ist und deshalb die Grösse von Konvektion und Transpiration massgebend beeinflusst. Nach Monteith (1973) beträgt die thermische Nettostrahlung, $a_R \cdot (R_{AU} - R_B)$, bei klarem Himmel und bei einer Lufttemperatur zwischen 0 und 20° und einer Oberfläche deren Temperatur etwa der Lufttemperatur entspricht zwischen 87 und 107 W m⁻². Auch bei grösseren Schwankungen der Tag- und Nachttemperaturen werden die Variationen nicht sehr gross. Von Eller et al. (1983) wurden in der Welwitschia-Vlakte der zentralen Namibwüste Variationen von 50 - 100 W m⁻² gemessen. Dies steht im Gegensatz zu den Werten der Globalstrahlung, die zwischen 0 und bis zu 1000 W m⁻² schwanken können.

Die Globalstrahlung G erstreckt sich über den Wellenlängenbereich von ca. 300 - 3000 nm. Ihre Quelle ist die Sonnenstrahlung einerseits in direkter Form, - die sogenannte direkte Sonnenstrahlung -, die aus der Richtung der Sonne auf die pflanzlichen Oberflächen auftrifft, und andererseits in indirekter Form, - die sogenannte diffuse Sonnenstrahlung -, die als Streustrahlung aus der Atmosphäre und als Reflexionsstrahlung aus der Umgebung aus allen Richtungen auf die Pflanze auftrifft.

Der Wellenlängenbereich von etwa 400 - 700 nm ist zudem die Energiequelle der photosynthetischen Prozesse und wird deshalb als photosynthetisch ausnützbare Strahlung (PAK) bezeichnet (Larcher 1976). Ihr Anteil beträgt im allgemeinen etwa 45 - 50 % der Globalstrahlung. Für die Untersuchung der Zusammenhänge zwischen der Photosynthese oder der Produktion der Pflanze und der absorbierten oder auftreffenden Globalstrahlung ist die möglichst exakte Erfassung der Globalstrahlung von grosser Bedeutung. Dies gilt auch für detaillierte Betrachtungen von Energiebilanzen und dem damit verknüpften Wärmehaushalt, sowie für dessen Einfluss auf die Photosynthese.

Die Photosynthese (Anderson und Denmead 1969), die Temperatur (Gates 1980) und die Stomaleitfähigkeit (Weiss und Norman 1985) sind von der absorbierten Strahlung in nicht-linearer Weise abhängig. Um aus gemessenen oder berechneten Globalstrahlungswerten auf diese Grössen schliessen zu können, ist es deshalb wichtig, die Bestrahlungsstärke jedes einzelnen Blattflächenelementes zu kennen. Es können deshalb aus gemessenen Tagessummen der Globalstrahlung oder der PAR keine direkten Rückschlüsse auf die Photosyntheseleistung gezogen werden (McCree 1965). Die auftreffende Strahlung muss also für jedes Blatt einer Pflanze mit ebenen Blättern oder bei gekrümmten Blättern für jedes durch eine Ebene approximierbare Blattflächenelement bekannt sein. Um die absorbierte Globalstrahlung bestimmen zu können, müssen deshalb drei verschiedene Problemkreise analysiert werden:

- Strahlungsangebot auf eine beliebig orientierte Empfängerfläche für irgendeinen Zeitpunkt,
- Geometrie der Empfängerfläche,
- optische Eigenschaften, insbesondere Absorptionseigenschaften der Empfängerfläche.

Der dritte Punkt bietet dabei am wenigsten Probleme. Die optischen Eigenschaften können durch bekannte Messtechniken (Eller 1972 und Tanner und Eller 1986) bestimmt werden. Untersuchungen von Tageeva und Brandt (1961) zeigen auch, dass der Absorptionsgrad pflanzlicher Oberflächen bis zu einem Einfallswinkel von 60 - 70° als konstant betrachtet werden kann.

In zahlreichen Arbeiten wurde versucht, die ersten beiden Punkte je nach Fragestellung und mit unterschiedlicher Gewichtung spezieller Aspekte anzugehen. Das Strahlungsangebot wird, - wie das auch in allen nachfolgend erwähnten Arbeiten geschieht -, als gesamte einfallende Globalstrahlung (Gates 1980), als Globalstrahlung und PAR (Varlet-Grancher 1975), als PAR (Garcia de Cortazar et al. 1985) oder als PAR und nahes Infrarot (700 - 3000 nm) (Thorpe et al. 1978) bestimmt. Der direkte und der diffuse Strahlungsanteil werden separat berechnet, wobei im allgemeinen die Berechnungen auf horizontal gemessenen Globalstrahlungs- oder PAR-Werten basieren. Da die qualitative Zusammensetzung der Globalstrahlung und damit auch der PAR-Anteil der Globalstrahlung im Laufe des Tages bei klaren Witterungsverhältnissen ausser bei tiefen Sonnenständen (Zenitdistanz der Sonne grösser als 80°) für eine horizontale Empfängerfläche nicht sehr stark ändert, ist es möglich, den PAR-Anteil auf einfache Weise aus der Globalstrahlung abzuschätzen (Monteith 1973). Um die absorbierte Strahlung des gesamten Bereiches abzuschätzen, müssen die beiden Bereiche PAR und nahes Infrarot separat betrachtet werden, da der Absorptionsgrad von Blättern bei 750 nm stark abnimmt (Gates 1980). Für Betrachtungen der Auswirkungen spezieller Absorptionseigenschaften (Eller 1984 und 1985) ist es notwendig, die spektrale Zusammensetzung sowohl der einfallenden Strahlung als auch des Absorptionsgrades zu kennen.

Die Erfassung der geometrischen Verhältnisse der bestrahlten Oberflächen werden je nach untersuchtem Objekt verschieden angegangen. Viele Arbeiten stehen im Zusammenhang mit Untersuchungen von Strahlungsverhältnissen innerhalb von Pflanzenbeständen und deren Produktion. Wegen der Komplexität der dort herrschenden geometrischen Verhältnisse, ist es praktisch nicht möglich, die Strahlungsverhältnisse jedes einzelnen Blattflächenelementes exakt zu erfassen. Die Berechnungen beruhen meist auf Gleichungen aus der Theorie des Strahlungstransportes mit Charakterisierung der optischen und geometrischen Eigenschaften des Bestandes in vertikaler Richtung (Ross 1975). Für die Berechnung der Photosyntheseleistung oder der Produktion eines Pflanzenbestandes müssen, wie schon erwähnt, die Stellungen der Blattflächen bekannt sein. Ausgehend von der Tatsache, dass die Blattstellungen die Produktion beeinflussen, wurde versucht

durch Annahme verschiedener Blattflächenindizes und Neigungswinkelverteilungen mit meist isotroper Azimutverteilung, eine optimale Architektur zu finden (Duncan et al. 1967, Duncan 1971, Kuroiwa 1970). Für vergleichende Berechnungen mit realen Pflanzenbeständen wurden aufwendige Messungen der Neigungswinkel- und Azimutverteilungen durchgeführt (Lang 1973, Ondok 1973). Untersuchungen wie die von Ledent (1976 und 1978) zur Auswirkung von gewellten und verdrehten Blättern auf die Strahlungsverteilung im Bestand können für die Bestimmung der Photosyntheseleistung nicht benützt werden, da keine Aussagen über die veränderte Verteilung der Blattflächenstellung gemacht werden. Wie schon Niilisk et al. (1970) feststellen, sind die Ergebnisse der Modellrechnungen schwierig zu verifizieren. Der Zusammenhang zwischen Photosyntheseleistung und Bestrahlungsstärke oder Strahlungsgenuss kann in solchen Fällen nicht direkt hergestellt werden. Ansätze dazu beruhen meist auf Labormessungen der Photosyntheserate, die für alle Blätter des Bestandes als gültig angenommen werden.

Ein anderer Versuch die geometrischen Verhältnisse zu erfassen ist die Darstellung ganzer Pflanzen durch verschiedene umhüllende geometrische Formen wie Kugeln, Kegel, Zylinder und Ellipsoide, wie das von Terjung und Louie (1972) und Mann et al. (1979) durchgeführt wurde. Es können dadurch absorbierte Strahlungsmengen und Energiebilanzen der ganzen Pflanzen untersucht werden, jedoch, da die Bestrahlungsstärken der einzelnen Blattflächenelemente nicht bekannt sind, können keine Rückschlüsse auf die gesamte Photosyntheseleistung gezogen werden. Thorpe et al. (1978) kombinieren daher für einen jungen Apfelbaum diese Betrachtungsweise mit der Berechnung des Strahlungsverlaufes zwischen den Blättern, was zu plausiblen Werten der Photosyntheseraten führt, wie ihr Vergleich mit gemessenen Raten zeigt.

Untersuchungen zum PAR-Strahlungsangebot im Zusammenhang mit der Photosyntheseleistung wurden an einzelnen Pflanzen auch für Sukkulenten durchgeführt, von Garcia de Cortazar et al. (1985) an *Opuntia ficus-indica*, von Woodhouse et al. (1980) an *Agave deserti* und von Nobel (1980) für die Auswirkungen der verschiedenen morphologischen Gestalt von Kakteen auf das PAR-Angebot. Bei den Untersuchungen von Garcia de Cortazar et al. (1985) wird die jährliche Produktion mittels Modellrechnung

abgeschätzt und mit Feldmessungen verglichen. In den anderen beiden Arbeiten wird die nächtliche Ansäuerung der CAM-Pflanzen mit dem täglichen PAR-Angebot verglichen. Die Autoren stellen fest, dass trotz der in den untersuchten Gebieten herrschenden hohen Einstrahlungswerte die CO_2 -Aufnahme wegen der zur Hauptsache senkrecht stehenden, photosynthetisch aktiven Flächen durch das Licht limitiert ist.

In dieser Arbeit soll nun ein anderer Einstieg in den geschilderten Problemkreis versucht werden. In einem ersten Teil soll die Globalstrahlung bei klaren Witterungsverhältnissen für beliebig orientierte Flächen in spektraler Verteilung berechnet werden. Dies wird es erlauben, den möglichst exakten Zusammenhang zwischen Bestrahlungsstärke und/oder Strahlungsgenuss und Photosyntheseleistung, Blattertemperatur, Transpiration oder Konvektion herzustellen. Die Auswirkungen spezieller Absorptionseigenschaften der Blätter oder Reflexionseigenschaften der Umgebung auf den Strahlungsgenuss können damit auch untersucht werden. Die geometrischen Verhältnisse müssen durch Ausmessen der zu untersuchenden Flächen bestimmt und der Beschattungsverlauf durch Beobachtung festgehalten werden. Dies führt insofern zu einer Einschränkung, dass grosse und umfangreiche Objekte wie Bäume und ganze Pflanzenbestände auf diese Weise wegen der hohen Datenzahl praktisch nicht zu untersuchen sind. Für die Erfassung der geometrischen Verhältnisse solcher Objekte stehen die bereits erwähnten Methoden zur Verfügung. In einem zweiten Teil soll in dieser Arbeit die Auswirkung des durch die Blattkrümmung verursachten veränderten Strahlungsgenusses nicht-ebener Blätter untersucht werden. Insbesondere soll dies in Hinsicht auf die Photosyntheseleistung des ganzen Blattes untersucht werden. Dabei kann die im ersten Teil entwickelte Methode zur Berechnung der Bestrahlungsstärke und des Strahlungsgenusses in spektraler Verteilung angewendet werden.

III. DAS RECHENPROGRAMM SOL

III.1. Konzept

An das zu entwickelnde Rechenprogramm SOL wurde die Anforderung gestellt, den Globalstrahlungsgenuss beliebig orientierter, ebener Flächen für einen beliebigen Tag oder Zeitpunkt für irgendeinen Ort berechnen zu können. Gekrümmte Flächen können damit ebenfalls untersucht werden, wenn sie durch eine genügend grosse Zahl ebener Teilflächen approximiert werden. Die Berechnung sollte auf der Basis des Globalstrahlungsspektrums erfolgen so, dass verschiedene spektrale Bereiche für sich und auch die Auswirkungen spezieller Absorptions- und Transmissionseigenschaften untersucht werden können. Die Berechnungen sollen bei klaren Witterungsverhältnissen anwendbar sein. Die schwierig zu erfassenden Auswirkungen von starken Trübungen oder von Bewölkung sollen im Rahmen dieser Arbeit nicht berücksichtigt werden.

Der spektrale Bereich, in dem die Berechnung zu erfolgen hat, ist durch den Bereich der einfallenden Sonnenstrahlung gegeben. Dieser lässt sich auf etwa 300 - 3000 nm eingrenzen. Die in diesem Bereich auf eine Fläche auftreffende Strahlung, die sogenannte Globalstrahlung, setzt sich aus der direkten Sonnenstrahlung, der Himmelsstrahlung und der von diesen beiden Komponenten an der Umgebung der Fläche (Boden, Vegetationen, Berge, Gewässer, Gebäude etc.) reflektierten Strahlung zusammen. Die direkte Sonnenstrahlung kann als parallel einfallendes Licht einer unendlich weit entfernten Quelle betrachtet werden, d.h. die von ihr auftreffende Bestrahlungsstärke gehorcht dem Lambertschen Cosinusgesetz. Die Himmelsstrahlung fällt von jedem Punkt der Himmelskugel als diffuse Strahlung ein. Die beiden Komponenten Himmelsstrahlung und reflektierte Strahlung werden unter dem Begriff "diffuse Strahlung" zusammengefasst, obwohl letztere oft auch gerichtete Anteile enthält. Sie wird jedoch hier in Vereinfachung als diffus betrachtet.

Für die Berechnung der Globalstrahlung in spektraler Verteilung ist eine möglichst detaillierte Erfassung der Absorptions- und Streuvorgänge an den Molekülen und Aerosolen der Atmosphäre notwendig. In den Arbeiten und dem Rechenprogramm LOWTRAN von

McClatchey et al. (1971), Selby und McClatchey (1975) und Selby et al. (1976) konnte dafür ein geeignetes Hilfsmittel gefunden werden. Sie gehen bei der Berechnung von einem Atmosphärenmodell mit 33 übereinanderliegenden Schichten aus. Die Transmissionen entlang eines bestimmten Atmosphärenweges können in Wellenzahlschritten von 5 cm^{-1} bestimmt werden.

Für die Berechnung der Himmelsstrahlung wurde versucht eine Lösung zu finden, die sich gut in das bestehende Programm zur Berechnung der Absorptions- und Streuvorgänge in der Atmosphäre einbauen liess. Die Himmelsstrahlung entsteht durch einfache und mehrfache Streuvorgänge an Molekülen und Aerosolen, die in komplexer Weise von der Zusammensetzung der Atmosphäre aus diesen Teilchen abhängen. In dem Begriff "Aerosole" werden Teilchen unterschiedlicher Natur (Wassertropfen, Staub-, Russteilchen u.a.) und damit auch verschiedener Streueigenschaften zusammengefasst. Die Berechnung der Himmelsstrahlung stellt deshalb eine komplexe Aufgabe dar, die für einen konkreten Fall im allgemeinen nicht exakt gelöst werden kann. Im Hinblick auf die Anwendung des Rechenprogramms SOL soll, wie bereits erwähnt, die Globalstrahlung, d.h. die Summe der direkten und der diffusen Strahlung, insbesondere bei klaren Verhältnissen möglichst exakt berechnet werden. Der Anteil der diffusen Strahlung an der Bestrahlungsstärke einer sonnenbeschienenen Fläche beträgt im Normalfall, d.h. bei Einfallswinkeln die kleiner als 75° sind, 10 - 20 %, wovon der Anteil der Himmelsstrahlung je nach Neigungswinkel der Empfängerfläche zwischen 0 und 100 % beträgt. Auf Grund dieser Überlegungen wurde eine Lösung gesucht, die zwar die Himmelsstrahlung möglichst gut berechnet, aber nicht einen Rechenaufwand benötigt, der denjenigen zur Berechnung der direkten Sonnenstrahlung um ein Vielfaches übersteigt.

III.2. Aufbau des Rechenprogramms SOL und Benützungshinweise

In Tabelle III.1 ist schematisch der Aufbau des in PL1 programmierten Rechenprogramms SOL dargestellt. Die einzelnen Berechnungsschritte werden im folgenden Kapitel (III.3.) besprochen. Die jeweiligen Abschnittnummern sind in der Tabelle III.1 angegeben. Die Berechnungen zur atmosphärischen Transmission und Streuung, die den Arbeiten von McClatchey et al. (1971), Selby und McClatchey (1975), Selby et al. (1976) und Smith et al. (1979) entnommen wurden, werden nicht im Detail beschrieben. Eine Liste der Programmanweisungen ist im Anhang (VI) beigefügt.

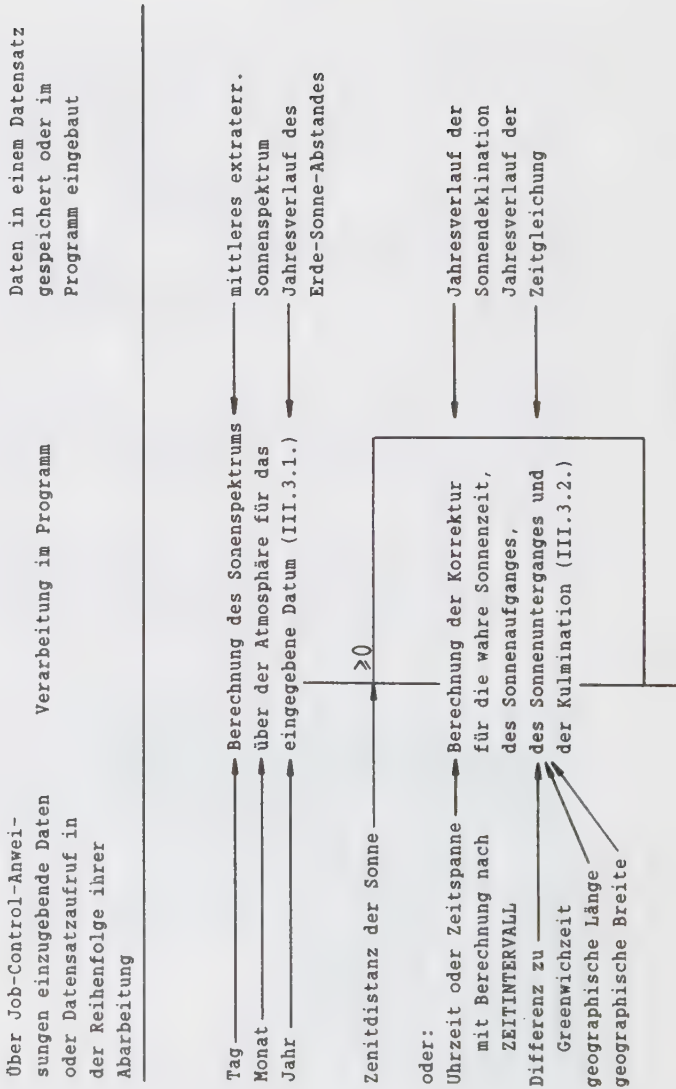
In Tabelle III.2 sind die Zeilen aus den Job-Control-Anweisungen aufgeführt, in denen die für die Abarbeitung des Programms notwendigen Datensätze und Einzeldaten enthalten sind. Wie sie auszufüllen sind, und welche Möglichkeiten sie beinhalten, wird anschliessend besprochen.

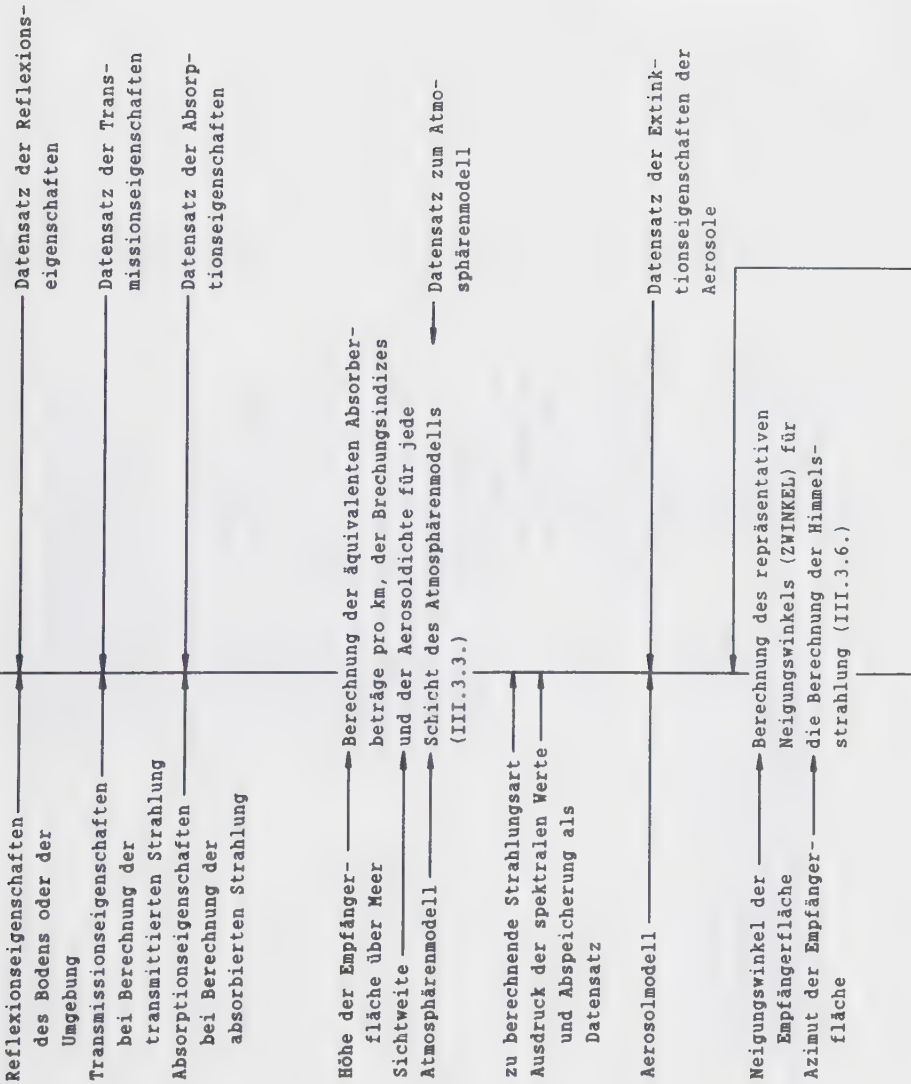
Tabelle III.2: Datensätze und Einzeldaten, die für die Abarbeitung des Rechenprogramms SOL angegeben werden müssen.

//BOX DD DSN=K6155A27.#KURS(XXXXXX),DISP=OLD	00000090
//REFLGR DD DSN=K6155A27.#KURS(ALLSOIL),DISP=OLD	00000095
//TRANSGR DD DSN=K6155A27.#KURS(TPLEX10),DISP=OLD	00000096
//ABSGR DD DSN=K6155A27.#KURS(AFU#1#5),DISP=OLD	00000097
//ATOMOD DD DSN=K6155A27.#KURS(MIDSUM),DISP=OLD	00000098
//AEROMO DD DSN=K6155A27.#KURS(RURAL),DISP=OLD	00000099
//SYSIN DD *	00000100
TEXT1=GLOBALSTRAHLUNG, ZUERICH 18.AUGUST /TAG	00000110
TEXT2=GTZ18#8/MIDSUM, ALLSOIL, SICHT = 23.0 (11-4-86)	00000120
TAG=18, MONAT=8, JAHR=1;	00000130
ZENITHDI=-66.80, SAZ=0.00, CAZ=1.00;	00000140
UHRZEIT1=5.30, UHRZEIT2=19.30, ZEITINTERVALL=0.15;	00000150
GREENWICHDIFFERENZ=1.00;	00000160
LAENGE=8.33, LAENGENRICHTUNG='OESTLICH', BREITE=47.23;	00000170
KUEVETTE='N', BLATT='N';	00000180
HOEHEB=0.455, SICHT=23.0;	00000190
STRART='GLOST', SPEKTRDATA='N';	00000200
NEIGUNGSWINKEL=0.00, AZIMUT=0.00;	00000202
HORIZONT=0.00, HORPROZ=0.00;	00000205
STATUS='CONT';	00000208
NEIGUNGSWINKEL=30.0, AZIMUT=180.0;	00000212
HORIZONT=0.00, HORPROZ=0.00;	00000215
STATUS='ENDE';	00000218

Tabelle III.1: Schematische Darstellung des Ablaufs des Rechenprogramms SOL.

Bei den Verarbeitungsschritten (Mitte) sind in Klammern die Abschnitte angegeben, in denen die Berechnungen beschrieben oder deren Quellen angegeben werden.





Horizonteinstellung —
 prozentuale Abdeckung der
 Hemisphärbkugel durch
 die Umgebung

Strahl. art HIST/GLOST:
 Unterprogramm VIA:
 Berechnung der totalen
 äquivalenten Absorber-
 beträge entlang des
 durch ZWINKEL definier-
 ten Atmosphärenweges
 (III.3.5.)

Berechnung des Stundenwinkels der
 Sonne (III.3.2.)

Zeitschleife für die Berechnung
 von UHRZEIT1 bis UHRZEIT2 in
 Schritten entspr. ZEITINTERVALL

Berechnung der Sonnenzenitdistanz
 und des Sonnenazimutes (III.3.2.)

Unterprogramm VIA:

Berechnung der refraktionskorrigierten Sonnenzenitdistanz und der totalen äquivalenten Absorberträge entlang dieses Atmosphärenweges (III.3.5.)

Berechnung des Winkels zwischen der Normalen zur Empfängerfläche und der Richtung zur Sonne (III.3.4.)

Strahlungsart HIST/GLOST:
Berechnung der Molekül- und Aerosolstreuphasen (III.3.6.)

Wellenlängenschleife

Str.art DIST/GLOST:	Str.art HIST/GLOST:
Berechnung der Transmissionskoeffizienten für Atmosphärenweg in Richtung Sonne (III.3.7.)	Berechnung und Summierung der Streustrahlungsanteile jeder Atmosphärenschicht aus der Richtung von ZWINKEL (III.3.6./7.)

← Liste der Extinktionskoeffizienten und Unterprogramme TRANSORA u. TRANSHUM zur Berechnung der Transmissionskoeffizienten

Cosinus-Korrektur
entspr. dem Winkel
zwischen Sonne und
Empfängerfläche
(III.3.8.)

Integration der Him-
melsstrahlung über den
von der Fläche aus ge-
sehenen Teil der Him-
melshalbkugel (III.3.8.)

Berechnung der Re-
flexionsstrahlung und
Integration über den
von der Fläche aus ge-
sehenen Boden- bzw.
Umgebungsanteil
(III.3.9.)

Strahlungsart GLOST:
Addition der direkten Sonnensstrah-
lung und der diffusen Strahlung

Integration der direkten, der
diffusen und/oder der Globalstrah-
lung für verschiedene Wellenlängen-
bereiche und Berechnung der Quanten
im Bereich 400-700 nm (III.3.10.)
(Ausdruck der berechneten Werte)

Integration der verschiedenen
Wellenlängenbereiche und der
Quanten von UHRZEIT1 bis zum
Berechnungszeitpunkt (III.3.10.)
(Ausdruck der berechneten Werte)

Berechnung der transmittierten
und/oder der absorbierten
Strahlung (III.3.10.)
(Ausdruck der berechneten Werte)

Berechnung des nächsten Stunden-
winkels

andere Empfänger-
flächenstellung

Bei Ausdruck und Abspeicherung der
spektralen Werte:
Tabelle der Wellenlängen mit extra-
terr. Spektrum, Transmissionskoeffi-
zienten und berechneten Strahlungs-
werten und Mittelung und Abspeiche-
rung der Strahlungsdaten im Daten-
satz BOX

DATENSÄTZE:

- BOX:** in diesem Datensatz werden die berechneten und entsprechend der ISCO-Spektroradiometerauflösung (III.3.1.) gemittelten spektralen Werte von 300 - 3000 nm abgespeichert. Die Wellenlängenschritte betragen 12.5 nm von 300 - 750 nm, 25 nm von 750 - 1350 nm und 50 nm von 1350 - 3000 nm.
- REFLGR:** enthält 165 Reflexionswerte von 220 - 3000 nm des Bodens und/oder der Umgebung für jede Wellenlänge für die die Strahlungswerte im Programm berechnet werden. Die Wellenlängenschritte betragen 5 nm von 220 - 610 nm, 10 nm von 610 - 1000 nm, 25 nm von 1000 - 1350 nm und 50 nm von 1350 - 3000 nm. Der Datensatz dient zur Berechnung der Reflexionsstrahlung. Es stehen drei Reflexionsdatensätze für den allgemeinen Gebrauch zur Verfügung: ALLSOIL für Böden, ALLVEG für Vegetationen und REDDES zur Beschreibung von roten Wüstenböden. Die Werte von ALLSOIL und ALLVEG wurden Wolfe und Zissis (1978) entnommen, diejenigen von REDDES Leeman et al. (1971).
- TRANSGR:** enthält 165 Transmissionswerte von 220 - 3000 nm (in Wellenlängenschritten wie REFLGR) des Mediums, dessen transmittierte Strahlung berechnet werden soll, z.B. die Werte von Plexiglas (Abschnitt IV.2.2.3.).
- ABSGR:** enthält 165 Absorptionswerte von 220 - 3000 nm (in Wellenlängenschritten wie REFLGR) des Materials, für das die von ihm absorbierte Strahlung berechnet werden soll, z.B. pflanzliche Oberflächen (Abschnitte III.4.5. und IV.3.1.).
- ATMOD:** enthält die Liste der Druck-, Temperatur-, Wasserdampfdichte- und Ozondichtewerte der 34 Schichten des gewählten Atmosphärenmodells. Es stehen drei Modelle zur Verfügung: MIDSUM, MIDWIN und TROPIC, die bis auf eine zusätzliche oberste Schicht (s. Abschnitt III.3.3.) mit den Atmosphärenmodellen "midlatitude summer", "midlatitude winter" und "tropical" von McClatchey et al. (1971) identisch sind. Für spezielle Zwecke kann die unterste Schicht mit gemessenen Druck-, Temperatur- und Feuchtwerten versehen werden, wie das z.B. bei den Berechnungen in III.4.5. ausgeführt wurde.
- AEROMO:** enthält die Extinktions- und Streueigenschaften

von 220 - 3000 nm (zweimal 165 Werte in Wellenlängenschritten wie REFLGR) des gewählten Aerosolmodells. Es stehen zwei Modelle zur Verfügung: RURAL und URBAN, die von Selby et al. (1976) übernommen wurden. RURAL beschreibt eine Zusammensetzung von 70% wasserlöslichen und 30% staubförmigen Aerosolen, URBAN ist zu 65% aus RURAL-Aerosolen und zu 35% aus Russteilchen zusammengesetzt.

Alle in dieser Arbeit vorgestellten Berechnungen wurden mit dem Aerosolmodell RURAL und dem Atmosphärenmodell MIDSUM oder seiner modifizierten Form (Abschnitte III.4.2. und III.4.5.) durchgeführt. Einzig für die Vergleichsrechnungen mit Hess (1939) in Abschnitt III.4.1. wurde das Modell MIDWIN verwendet.

EINZELDATEN:

TEXT1, TEXT2: zwei Textzeilen, die für einen beliebigen Kommentar reserviert sind. Sie stehen am Anfang des Schnelldruckerausdruckes, über der Tabelle der spektralen Werte und am Anfang des BOX-Datensatzes.

TAG: Tag des zu berechnenden Datums.

MONAT: Monat des zu berechnenden Datums.

JAHR: dient der Beschreibung der Lage des Jahres bezüglich der Schaltjahre. Es ist eine der Zahlen 0, 1, 2 oder 3 anzugeben. Das Schaltjahr hat die Nummer 3, z.B. die Jahre 1976, 1980, 1984, 1988 etc. Die übrigen Jahre werden entsprechend nummeriert, also 0 für 1977, 1981, 1985, 1 für 1978, 1982, 1986 und 2 für 1979, 1983, 1987.

ZENITHDI: enthält die Zenitdistanz der Sonne, wenn die Berechnung für eine bestimmte Zenitdistanz durchgeführt werden soll. Sie wird in Grad mit Dezimalstellen angegeben. Wird die Zenitdistanz vom Programm durch eine UHRZEIT-Angabe berechnet, wird ein beliebiger negativer Wert eingesetzt. In diesem Fall können für SAZ und CAZ beliebige Werte stehen.

SAZ: Sinus des Sonnenazimutes. Er wird benötigt, wenn die Empfängerfläche nicht horizontal exponiert ist. In diesem Fall muss jedoch nur die relative Lage des Sonnenazimutes bezüglich des Azimutes der Empfängerfläche angegeben werden. In allen anderen

Fällen kann ein beliebiger Wert eingesetzt werden.

CAZ: Cosinus des Sonnenazimutes. Es gilt dieselbe Bemerkung wie für SAZ.

Wenn für ZENITHDI ein positiver Wert eingesetzt wird, werden bei der Abarbeitung des Programms die folgenden drei Zeilen der Dateneingabe übersprungen, d.h. die Grössen UHRZEIT1 bis BREITE können irgendwelche Werte enthalten.

UHRZEIT1: bezeichnet den ersten Zeitpunkt, für den die Berechnung durchgeführt werden soll. Er wird in Stunden und Minuten angegeben, nicht mit Dezimalstellen, d.h. 6h30 = 6.30. Ist er früher als der Sonnenaufgang angesetzt, wird so lange der Wert von ZEITINTERVALL dazugezählt, bis UHRZEIT1 grösser als der Zeitpunkt des Sonnenaufganges ist, d.h. der erste berechnete Wert liegt nach dem Sonnenaufgang.

UHRZEIT2: bezeichnet das Ende der Zeitspanne, für die die Berechnung durchgeführt werden soll. Sie wird wie UHRZEIT1 in Stunden und Minuten angegeben. Wenn UHRZEIT2 später als der Sonnenuntergang ist, wird die Berechnung bis zum letzten Zeitpunkt vor Sonnenuntergang entsprechend der Addition von ZEITINTERVALL ausgeführt.

ZEITINTERVALL: gibt die Zeitschritte an, für die die Berechnungen von UHRZEIT1 bis UHRZEIT2 stattfinden. Es ist ebenfalls in Stunden und Minuten und nicht in Dezimalstellen anzugeben. Bei ZEITINTERVALL-Werten, die kleiner als eine Stunde sind, muss 60 ein ganzzahliges Vielfaches der angegebenen Minuten sein. Bei grösseren Werten sind ganze Stunden zu wählen.

1. Spezialfall:

UHRZEIT1=UHRZEIT2: die Berechnung wird allein für diesen Zeitpunkt durchgeführt. Der Wert von ZEITINTERVALL wird ignoriert.

2. Spezialfall:

UHRZEIT1 > 24.0: die Berechnung wird für den Zeitpunkt der Kulmination der Sonne durchgeführt.

GREENWICHDIFFERENZ: gibt die Differenz der Zeitzone, für die die Zeitangaben von UHRZEIT1 und UHRZEIT2 gelten, gegenüber der Greenwichzeit an. Der Zahlenwert ist ebenfalls in Stunden und Minuten anzugeben.

- LAENGE:** bezeichnet die geographische Länge des Ortes, für den die Berechnung stattfindet. Sie ist in Grad und Minuten anzugeben (z.B. $8^{\circ}33'$ = 8.33) und positiv, die Ost- oder Westlage wird durch LAENGENRICHTUNG bestimmt.
- LAENGENRICHTUNG:** beschreibt die Lage des Ortes bezüglich 0 Grad Länge. Es ist "OESTLICH" oder "WESTLICH" einzusetzen.
- BREITE:** gibt die geographische Breite des Ortes an. Sie ist wie die geographische Länge in Grad und Minuten und positiv einzusetzen, wenn der Ort nördlich des Äquators liegt, negativ, wenn er südlich liegt.
- KUEVETTE:** entscheidet, ob die Strahlung für ein in einer Küvette eingeschlossenes Objekt berechnet wird. In diesem Fall müssen die Transmissionseigenschaften des Küvettenmaterials berücksichtigt werden (Datensatz TRANSGR). Wird eine Berechnung der transmittierten Strahlung gewünscht, wird "J" für ja eingegeben, sonst "N" für nein.
- BLATT:** entscheidet, ob absorbierte Strahlung berechnet wird. In diesem Fall müssen die Absorptionseigenschaften des Objektes berücksichtigt werden (Datensatz ABSGR). Wird eine Berechnung der absorbierten Strahlung gewünscht, wird "J" für ja eingegeben, sonst "N" für nein.
- HOEHEB:** gibt die Höhe des Ortes der Empfängerfläche über Meer an. Sie ist in Kilometern über NN einzugeben.
- SICHT:** beschreibt die Sichtweite und damit den Aerosolgehalt der untersten Schicht des Atmosphärenmodells, d.h. für Meereshöhe. Sie ist in Kilometern anzugeben, wobei 23 km klaren Bedingungen entsprechen und 5 km sehr trüben. In der Umgebung von Siedlungszonen auf grösserer Höhe über Meer (z.B. Johannesburg, Südafrika) ist die beobachtete Sichtweite (z.B. 30 km) für die Berechnung im Programm zu gross, da sie für Meereshöhe wesentlich kleiner wäre (Grössenordnung 6 km). Es ist deshalb der kleinere Wert einzusetzen.
- STRART:** gibt die zu berechnende Strahlungsart an. "DIST" steht für die direkte Sonnenstrahlung, "HIST" für die diffuse Strahlung und "GLOST" für die Globalstrahlung.

- SPEKTRDATA:** entscheidet, ob die berechneten Strahlungswerte als spektraler Datensatz in BOX abgespeichert werden sollen; "J" gilt für ja, "N" für nein.
- NEIGUNGSWINKEL:** gibt den Neigungswinkel der Normalen der Empfängerfläche zur Vertikalen an (in Grad mit Dezimalstellen).
- AZIMUT:** gibt das Azimut der Projektion der Normalen der Empfängerfläche auf die Horizontalebene an (in Grad mit Dezimalstellen). Das Azimut beträgt 0 Grad in Südrichtung und wird positiv über Westen-Norden-Osten gezählt.
- HORIZONT:** beschreibt die Horizontüberhöhung (in Grad mit Dezimalstellen). Sie bewirkt, dass die direkte Sonnenstrahlung erst berechnet wird, wenn die Sonnenhöhe grösser als HORIZONT ist.
- HORPROZ:** beschreibt die Abdeckung der Himmelshalbkugel durch die Umgebung (Horizontüberhöhung und über diese hinausragende Objekte). Sie ist in Prozent anzugeben. Die Himmelsstrahlung wird um diesen Anteil vermindert, die reflektierte Strahlung erhöht.
- STATUS:** entscheidet, ob eine weitere Berechnung für eine andere Stellung der Empfängerfläche mit Horizontangaben, aber unter sonst gleichbleibenden Bedingungen durchgeführt werden soll. Bei der Angabe "CONT" werden die nächsten Werte von NEIGUNGSWINKEL, AZIMUT, HORIZONT und HORPROZ eingelesen, d.h. die Zeilen 202 - 208 von Tabelle III.2 sind zu wiederholen, bei "ENDE" wird die Abarbeitung des Programms abgeschlossen.

III.3. Berechnungsgrundlagen

III.3.1. Extraterrestrisches Spektrum der solaren Bestrahlungsstärke und spektrale Auflösung der Berechnungen

Die wichtigste Grundlage für die Berechnung der spektralen Bestrahlungsstärken, ist das zur Verfügung stehende extraterrestrische Spektrum, aus dem die Werte berechnet werden. Die Unsicherheiten und Fehler, mit denen es behaftet ist, sind das Minimum der Fehler, die bei den daraus berechneten Spektren vorhanden sind. Seine Auflösung stellt zudem die obere Grenze der erreichbaren Auflösung dar. Es ist daher wichtig die Wahl des Spektrums so zu treffen, dass die Auflösung denjenigen der zur Verfügung stehenden Messgeräten entspricht und den Fragestellungen, der Ökophysiologie der Pflanzen angemessen ist.

Der Bereich, in dem die Berechnungen durchgeführt werden sollen, erstreckt sich, wie bereits in der Einleitung erwähnt, von 300 - 3000 nm. In Tabelle III.3 sind die für die Messung von spektralen Verteilungen und optischen Eigenschaften pflanzlicher Oberflächen im Rahmen dieser Arbeit zur Verfügung stehenden Spektroradiometer mit ihrem Messbereich, Wellenlängenabstand der Messpunkte, ihrer Bandbreite und ihrem Messfehler aufgeführt. Die entsprechenden Daten der beiden verwendeten, mittleren extraterrestrischen Spektren von Thekaekara (1973) und Neckel und Labs (1984) sind ebenfalls eingetragen. Diese beiden spektralen Verteilungen sind in Abbildung III.1 zu sehen. Da die untere Grenze (bei 300 nm) in grösseren Höhenlage zu kürzeren Wellenlängen hin verschoben sein kann, und die Ozonabsorptionskoeffizienten nach Selby und McClatchey (1975) bis 200 nm angegeben werden, wurde 220 nm als untere Wellenlängengrenze gewählt.

In einer ersten Phase während der Erstellung des Rechenprogramms wurde das Spektrum nach Thekaekara (1973) verwendet und die Berechnung der Transmissionskoeffizienten auf dessen Wellenlängenschritte abgestimmt (Abschnitt III.3.7.). Durchgeführte Vergleiche von gemessenen und berechneten Spektren zeigten jedoch stets vorhandene Differenzen im Bereich 500 - 750 nm. Der von Pierce und Allen (1977) durchgeführte Vergleich verschiedener Bestimmungen des extraterrestrischen Spektrums liess vermuten, dass dies mit dem speziellen, verwendeten Spektrum zusammenhängt. Die spektrale Verteilung nach

Tabelle III.3: Wellenlängenbereiche, Wellenlängenschritte, Halbwertbandbreiten und zu erwartender Fehler der einzelnen Werte für das ISCO- und das LICOR-Spektroradiometer, die extraterrestrischen Spektren von Thekaekara (1973) und Neckel und Labs (1984), sowie der nach Selby und McClatchey (1975) berechneten Transmissionskoeffizienten

	Bereich (nm)	Wellenl.- schritte (nm)	Band- breite (nm)	Fehler (%)
ISCO	380 - 750	12.5	15	±10
	750 - 1350	25	30	"
	1350 - 1500	50	30	"
LICOR	300 - 1100	5	6	±7
Thekaekara	220 - 610	5	10	±5
	610 - 1000	10	10	"
	1000 - 2000	50 [*]	50	"
	2000 - 3000	100 [*]	100	"
Neckel u. Labs	(220 - 3000)	(#)	(#)	±1
McClatchey	(220 - 3000)	(#)	(#)	<10

* Die Werte zwischen 1000 und 1350 nm bzw. 2000 und 3000 nm wurden interpoliert, um Wellenlängenschritte von 25 nm (entspr. ISCO) bzw. 50 nm zu erhalten.

Die Wellenlängenschritte und der gemittelte Bereich wurden entsprechend dem Thekaekara-Spektrum gewählt (s. Text).

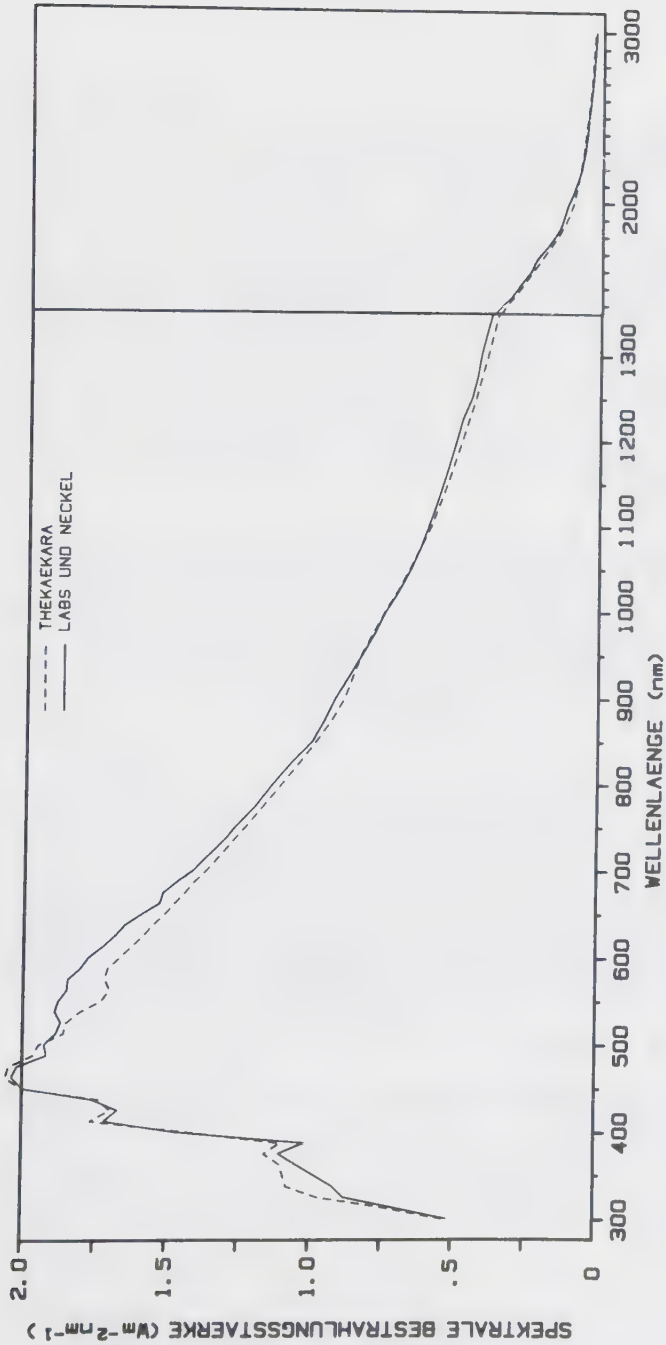


Abb. III.1: Mittlere extraterrestrische Bestrahlungsstärken in spektraler Verteilung nach Thekaekara (1973) und Neckel und Labs (1984)

Thekaekara (1973) liegt in diesem Bereich deutlich tiefer als diejenigen von Labs und Neckel (1970) und Arvesen et al. (1969). Die Einführung des Spektrums nach Neckel und Labs (1984) bestätigte die Vermutung. Die 1, 2 und 5 nm Intervalle im Bereich 330 - 1225 nm wurden in den Wellenlängenschritten und entsprechend den Bandbreiten von Thekaekara (1973) gemittelt. Im Bereich 870 - 1250 nm wurde die empfohlene Korrektur von 2% zur Berücksichtigung der solaren Linienabsorption angebracht. Die Werte von 220 - 300 nm wurden Broadfoot (1972), von 300 - 325 nm und 1250 - 2450 nm Arvesen et al. (1969) und von 2450 - 3000 nm Labs und Neckel (1970) entnommen und ebenfalls für die Wellenlängenschritte und entsprechend der Bandbreite der Thekaekara-Werte gemittelt. Alle in dieser Arbeit vorgestellten Berechnungen wurden mit dem Spektrum nach Neckel und Labs (1984) durchgeführt.

Die Werte der mittleren extraterrestrischen Bestrahlungsstärken, die in der Programmanweisungsliste (Teil VI.) in den Zeilen 710 - 940 zu finden sind, beziehen sich auf den mittleren Abstand zwischen Erde und Sonne. Die aktuelle Bestrahlungsstärke $I(\lambda)$ eines bestimmten Tages ist unter Berücksichtigung des Jahresverlaufes des Erde-Sonne-Abstandes zu berechnen. Es gilt die Beziehung

$$I(\lambda) = (R_0^2/R^2) \cdot I_0(\lambda) \quad (\text{III.1})$$

wobei R_0 = mittlerer Erde-Sonne-Abstand

R = aktueller Erde-Sonne-Abstand

$I_0(\lambda)$ = extraterr. Bestr.stärke bei R_0 .

Das Verhältnis R/R_0 ist im "Astronomical Almanac" (1981) tabelliert. Die Werte wurden in Abständen von je fünf Tagen beginnend beim 31. Dezember in der Form

$$f(R) = (R_0/R)^2 - 1 \quad (\text{III.2})$$

ins Programm eingefügt (Zeilen 1020 - 1140 in Teil VI.), so dass sich $I(\lambda)$ nach

$$I(\lambda) = I_0(\lambda) + f(R) \cdot I_0(\lambda) \quad (\text{III.3})$$

berechnet.

III.3.2. Berechnung der Zenitdistanz, des Azimuts und der Zeitpunkte der Kulmination, des Aufgangs und Untergangs der Sonne

Die Position der Sonne wird im ortsabhängigen Äquatorsystem (Abb.III.2.) durch die Deklination δ_s und den Stundenwinkel s_s beschrieben. Der Stundenwinkel s_s ist um 12 Stunden gegen über der wahren Sonnenzeit t_s verschoben:

$$s_s = t_s - 12 \text{ h}, \quad (\text{III.4})$$

wobei sich die wahre Sonnenzeit t_s aus

$$t_s = t_{zz} + t_{\text{lok}} + \Delta t \quad (\text{III.5})$$

mit t_{zz} = Uhrzeit der betreffenden Zeitzone
 t_{lok} = lokale Korrektur des Ortes = $l - l_{zz}$
 l = geographische Länge des Ortes in (h)
 l_{zz} = geogr. Länge für die die Zonenzeit
 gleich der mittleren Sonnenzeit ist
 in (h)
 Δt = Wert der Zeitgleichung für den
 betreffenden Tag in (h)

berechnet. Die jährliche Variation der Zeitgleichung und der Sonnendeklination wurde "Astronomical Almanac" (1981) entnommen und wie die Änderung des Erde-Sonne-Abstandes (Abschnitt III.3.1.) im Abstand von jeweils fünf Tagen ins Programm eingefügt (Zeilen 1300 - 1420 bzw. 1160 - 1280 in Teil VI.). Die Werte für die Tage dazwischen werden linear interpoliert. Das Schaltjahr zu 366 Tagen wird berücksichtigt, in dem die Lage des Jahres bezüglich des Schaltjahres bei den Einzeldaten (Tabelle III.2 in Kap. III.2.) angegeben wird.

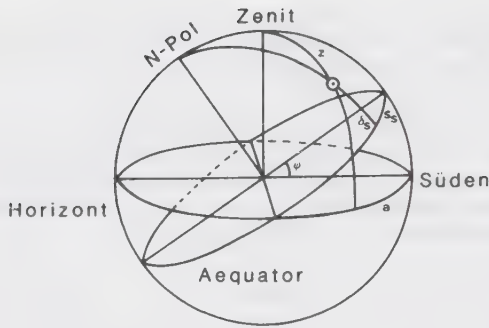


Abb. III.2: Beschreibung des Ortes der Sonne im ortsabhängigen Äquatorsystem durch die Deklination δ_s und den Stundenwinkel s_s und die Beschreibung eines Punktes, in diesem Fall der Sonne, in dem um die geographische Breite φ gegenüber dem Äquatorsystem gekippten Horizontsystem durch die Zenitdistanz z und das Azimut a .

Im Horizontsystem (Abb.III.2) wird die Lage eines Punktes an der Himmelskugel durch die Zenitdistanz z und das Azimut a beschrieben, wobei 0° Azimut mit der Südrichtung zusammenfällt und positiv über Westen-Norden-Osten gezählt wird. Wenn das Horizontsystem gegenüber dem Äquatorsystem um die geographische Breite φ gekippt ist, lassen sich die Koordinaten (z, a) aus der Deklination δ und dem Stundenwinkel s des Äquatorsystems mit den Gleichungen

$$\cos z = \sin \delta \cdot \sin \varphi + \cos \delta \cdot \cos \varphi \cdot \cos s \quad (\text{III.6})$$

und

$$\sin a = (\cos \delta / \sin z) \cdot \sin s \quad (\text{III.7})$$

berechnen. Um entscheiden zu können in welchem Quadranten das Azimut liegt, wird zusätzlich zum Sinus der Cosinus des Azimuts

nach der Gleichung

$$\cos a = (1/\sin z) \cdot (\sin \varphi \cdot \cos \delta \cdot \cos s - \cos \varphi \cdot \sin \delta) \quad (\text{III.8})$$

bestimmt.

Bei Kulmination der Sonne gilt

$$s_s = 0. \quad (\text{III.9})$$

Wird dies zusammen mit der Deklination δ_s der Sonne in Gleichung (III.6) eingesetzt, ergibt sich für die Zenitdistanz der Sonne

$$z_s = \varphi - \delta_s. \quad (\text{III.10})$$

Für die Berechnung des Zeitpunktes von Sonnenaufgang bzw. -untergang wird in Gleichung (III.6) $z_s = 90^\circ$ eingesetzt, und es ergibt sich für den Stundenwinkel die Beziehung

$$\cos(\pm s_s) = -\operatorname{tg} \delta_s \cdot \operatorname{tg} \varphi. \quad (\text{III.11})$$

Die Uhrzeit berechnet sich anschliessend aus Gleichung (III.5) durch Auflösen nach t_{zz} .

III.3.3. Berechnung der äquivalenten Absorberbeträge für jede Schicht des Atmosphärenmodells

In diesem Berechnungsschritt werden entsprechend den Ausführungen von Selby und McClatchey (1975) die Absorberbeträge jeder Atmosphärenschicht pro Kilometer Schichtdicke bezogen auf Normaldruck und Normaltemperatur (NTP-Bedingungen) berechnet. Diese sogenannten äquivalenten Absorberbeträge werden im Programm SOL für Wasserdampf, für die einheitliche Gasmischung ("uniformly mixed gases"), für Ozon, für die Molekül- und die Aerosolteilchendichte benötigt. Die einheitliche Gasmischung umfasst die Moleküle CO_2 , N_2O , CH_4 , CO und O_2 , die in der ganzen Atmosphäre in gleichbleibenden Anteilen vorhanden angenommen werden. Die Atmosphärenmodelle wurden zwar gegenüber denjenigen von Selby und McClatchey (1975) für die Atmosphärenwegberechnung

(Abschnitt III.3.5.) um eine Schicht nach oben (34. Schicht) erweitert. Dies betrifft jedoch die Berechnung der äquivalenten Absorberbeträge nicht, da die Werte für den Druck, die Wasserdampf-, die Ozon- und die Teilchendichten gleich 0 gesetzt wurden.

Der einzige, geringfügige Unterschied zu den Berechnungen von Selby und McClatchey (1975) besteht in der benützten Näherungsformel für den Brechungsindex der Luft. Sie wurde nach Edlen (1966) berechnet zu

$$(n - 1) = 10^{-6} \cdot (77.55 + 0.4351 / \lambda^2) \cdot (p / T) - p_{H_2O} \cdot (43.49 - 0.347 / \lambda^2) \quad (III.12)$$

mit λ = Wellenlänge in (μm)

p = Luftdruck in (mbar)

T = Temperatur in ($^{\circ}\text{C}$)

p_{H_2O} = Partialdruck des Wasserdampfs
in (mbar).

Die Zahlenwerte im ersten Teil der Gleichung (77.55 und 0.4351) unterscheiden sich nur unwesentlich von denjenigen, die Selby und McClatchey (1975) angeben. Als mittlere Wellenlänge des gesamten Wellenlängenbereiches wurde für die Berechnung des Brechungsindex der Atmosphärenschichten $0.75 \mu\text{m}$ gewählt.

III.3.4. Berechnung des Winkels zwischen der Normalen der Empfängerfläche und der Richtung zur Sonne

Die Stellung der Empfängerfläche wird durch den Neigungswinkel z_{FL} und das Azimut a_{FL} der Normalen zur Empfängerfläche charakterisiert (Abbildung III.3). Der Winkel γ zwischen der Richtung zur Sonne, die durch die Koordinaten (z_s , a_s) bestimmt ist (Abschnitt III.3.2.), und der Flächennormale berechnet sich nach der Gleichung

$$\cos \gamma = \cos z_{FL} \cdot \cos z_s + \sin z_{FL} \cdot \sin z_s \cdot \cos (a_s - a_{FL}). \quad (III.13)$$

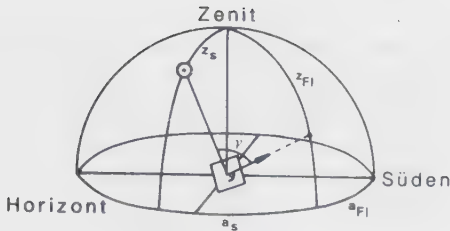


Abb. III.3: Winkel γ zwischen der Normalen zur Empfängerfläche mit den Koordinaten (z_{FL} , a_{FL}) und der Richtung zur Sonne mit den Koordinaten (z_s , a_s).

III.3.5. Unterprogramm VIA zur Berechnung der totalen äquivalenten Absorberbeträge entlang eines Atmosphärenweges

Die entlang eines Atmosphärenweges effektiv wirksamen Absorberbeträge werden durch die Zenitdistanz z der Atmosphärenwegrichtung in jeder Schicht bestimmt und werden damit durch die Refraktion und die Erdkrümmung beeinflusst (Abbildung III.4). Die Berechnungen geschehen im wesentlichen nach Selby und McClatchey (1975), wobei sie den speziellen Verhältnissen für die Sonnenstrahlung, d.h. Strahlungseinfall von ausserhalb der Atmosphäre auf die Erdoberfläche, angepasst wurden. Sie werden während der Abarbeitung des Programms sowohl für die Berechnung der direkten Sonnenstrahlung als auch bei der Berechnung der Himmelsstrahlung benötigt.

Beim Aufruf des Unterprogramms VIA zur Berechnung des Atmosphärenweges entsprechend einer bestimmten Zenitdistanz (Zenitdistanz der Sonne bzw. repräsentativer Neigungswinkel aus Abschnitt III.3.6.) ergeben sich zwei unterschiedliche Situationen. Handelt es sich dabei um eine aus einer Zeitangabe berechnete Sonnenzenitdistanz, so gilt diese ausserhalb der Atmosphäre und ist nicht refraktionskorrigiert. Bei der Berechnung aus der Angabe einer bestimmten, vom Beobachter gemessenen Sonnenzenitdistanz und der Berechnung des Atmosphärenweges für die Streustrahlung braucht die Zenitdistanz keine Refraktionskorrektur. Die Berechnung des Atmosphärenweges

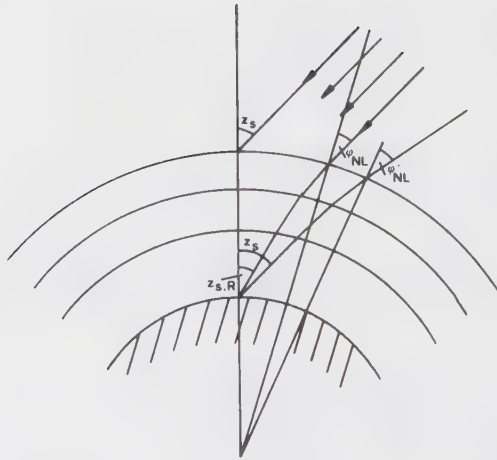


Abb. III.4: Darstellung zur Berechnung der refraktionskorrigierten Zenitdistanz $z_{s,R}$ der Sonne aus der berechneten, ausserhalb der Atmosphäre gültigen Zenitdistanz z_s und zur Berechnung des Winkels φ_{NL} , mit dem die Sonnenstrahlung auf die Erdatmosphäre auftrifft.

beginnt im Unterprogramm VIA im Gegensatz zur Berechnungsrichtung bei Selby und McClatchey (1975) mit der obersten Atmosphärenschicht, d.h. im zweiten Fall muss bei Rechnungsbeginn eine Refraktionskorrektur angebracht werden, die sich bis zur untersten Schicht wieder aufhebt. Die Situation für den ersten der beiden geschilderten Fälle zeigt Abbildung III.4. Der Winkel φ_{NL} mit dem die Sonnenstrahlung auf die oberste Atmosphärenschicht auftrifft ist aber in beiden Fällen nicht bekannt und muss zuerst durch eine Refraktionsberechnung von der untersten zur obersten Schicht bestimmt werden. Im ersten Fall, bei der Berechnung aus einer bestimmten Uhrzeit, wird dieser Winkel durch ein kurzes Iterationsverfahren bestimmt, indem

zunächst der berechnete, ausserhalb der Atmosphäre geltende Wert von z_s für den Wert von $z_{s,R}$ genommen wird. Die Refraktionsberechnung mit Bestimmung von ϕ'_{NL} wird durchgeführt, die Zenitdistanz z_s der Sonne um die Refraktion korrigiert und die gleiche Berechnung zur Bestimmung von ϕ_{NL} mit dem neuen Wert von $z_{s,R}$ durchgeführt. Anschliessend werden für beide Fälle in derselben Weise die totalen äquivalenten Absorberbeträge nach Selby und McClatchey berechnet.

III.3.6. Berechnung der Himmelsstrahlung

In einer ersten Phase wurde versucht die Berechnung der Streustrahlung nach Smith et al. (1979) für die Streustrahlung erster Ordnung aus einem bestimmten Punkt P der Hemisphärikugel mit den Koordinaten (θ, φ) zu verwenden. Ihre Berechnung geschieht unter Zuhilfenahme der vierten Version des LOWTRAN-Programms nach Selby et al. (1978). Der Beitrag $H_{P,i}(\lambda, \gamma_1)$ der i-ten Schicht des Atmosphärenmodells zur Himmelsstrahlung H_P aus dem Punkt P berechnet sich nach der Gleichung

$$H_{P,i}(\lambda, \gamma_1) = I_0(\lambda) \cdot t' \cdot \sigma \cdot t \cdot P(\cos \gamma_1) \cdot N_1 \quad (\text{III.14})$$

mit γ_1 = Streuwinkel

$I_0(\lambda)$ = extraterr. Bestrahlungsstärke bei der Wellenlänge λ in ($\text{W m}^{-2} \text{ nm}^{-1}$)

t' = Transmission von ausserhalb der Atmosphäre bis zur i-ten Schicht entlang des Atmosphärenweges in Richtung Sonne

σ = Streuquerschnitt in (cm^2)

t = Transmission von der i-ten Schicht bis zur Empfängerfläche entlang des Atmosphärenweges in Richtung des Punktes P

$P(\cos \gamma_1)$ = Streuphasenfunktion in (sr^{-1})

N_1 = Dichte der streuenden Teilchen in Richtung der Empfängerfläche in der i-ten Schicht in (cm^{-2}).

Die gesamte Himmelsstrahlung $H_P(\lambda)$ aus dem Punkt P ergibt sich aus der Summation dieser Beiträge über alle Schichten. Für die

weitere Berechnung der Himmelsstrahlung aus dem ganzen von der Fläche aus gesehenen Teil der Himmelshalbkugel, $H(\lambda)$, wurden die Annahmen getroffen, dass die Himmelsstrahlung isotrop ist, und der Beitrag jedes Himmelspunktes gleich demjenigen senkrecht über der Empfängerfläche ist. $H(\lambda)$ lässt sich also durch Integration über den Raumwinkel und Berücksichtigung des Lambertischen Cosinusgesetzes durch die Gleichung

$$H(\lambda) = H_p(\lambda) \cdot \int_{\varphi} \int_{\theta} \sin \theta \cdot \cos \theta \, d\theta \, d\varphi, \quad (\text{III.15})$$

darstellen, wobei die Integrationsgrenzen von θ und φ entsprechend der Neigung der Empfängerfläche zu setzen sind (Abschnitt III.3.8.).

Vergleiche von berechneten und gemessenen Tagesgängen der Himmelsstrahlung auf eine horizontale Empfängerfläche (Abschnitt III.4.2.) zeigten bald, dass die auf diese Weise berechnete Himmelsstrahlung viel zu starken Schwankungen unterworfen ist. Dies drückte sich aus durch:

- zu starke Abhängigkeit von den Streuphasen ($P(\cos \gamma_1)$), insbesondere bei kleinen Streuwinkeln, - die dem jeweiligen Winkel zwischen der Richtung zur Sonne und der Normalen der Empfängerflächen entsprechen -, wo die Streuphase der Aerosolstreuung stark ansteigt (Abb. III.5),
- zu starke Abhängigkeit von der Sonnenzenitdistanz, die den Betrag von t' in Gleichung (III.14) beeinflusst.

Die Suche nach einer Verbesserung wurde von folgender Ueberlegung gestützt: berechnet man das Integral von Gleichung (III.15) für jeweils 5°-Intervalle von θ , so zeigt sich, dass bei isotroper Himmelsstrahlungsverteilung der grösste Beitrag zur Himmelsstrahlung auf die Empfängerfläche aus dem Ring in 40 bis 50° Neigung zur Empfängerfläche stammt. Aus dieser Tatsache ergibt sich die Konsequenz, dass sowohl der Streuwinkel für die isotrope Berechnung als auch der Atmosphärenweg, den die gestreute Strahlung bis zur Empfängerfläche durchläuft, anders gewählt werden müssen. Betrachtet man für verschiedene γ , dem

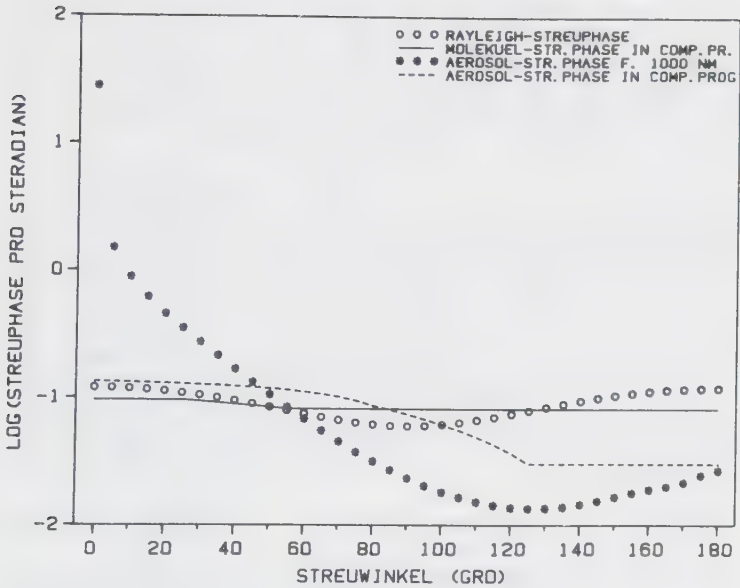


Abb. III.5: Verlauf der Rayleighstreuphasen und Aerosolstreuphasen (für 1000 nm nach Smith et al. 1979) in Abhängigkeit des Streuwinkels, sowie die entsprechenden, im Programm SOL verwendeten Streuphasen, wobei hier die x-Achse dem Winkel zwischen der Empfängerflächennormalen und der Richtung zur Sonne entspricht

Winkel zwischen der Empfängerflächennormalen und der Richtung zur Sonne, die auf dem in 45° Neigung zur Empfängerfläche auftretenden Streuwinkel, so sieht man, dass der mittlere Streuwinkel nicht kleiner als 45° wird. Werden die mittleren Streuphasen der jeweils vertretenen Streuwinkel gemittelt, und der dem Mittel entsprechende Streuwinkel bestimmt, so wird der Bereich der vertretenen Winkel noch stärker eingeschränkt. Eine Zusammenstellung ist in Tabelle III.4 angegeben.

Es wurde nun versucht für jeden Winkel γ einen "repräsentativen" Streuwinkel und je nach Neigungswinkel der Empfängerfläche einen "repräsentativen" Neigungswinkel für die Atmosphärenwegberechnung zu finden, damit die Annahme der isotropen Verteilung beibehalten werden kann. Unter Zuhilfenahme von Tabelle III.4 und verschiedenen berechneten Vergleichen wurde die in Abbildung III.5 dargestellte Streuphasenabhängigkeit angenommen. Die Streuphase für die Molekülstreuung ist für γ zwischen 0 und 25° und 80 und 110° konstant, dazwischen nimmt sie linear ab. Bei der Aerosolstreuung wird die Abhängigkeit zwischen 0 und 80° durch die Gleichung

$$P(\gamma) = \text{tg}^{-1}((105 - \gamma)/20) / 600 \quad (\text{III.16})$$

beschrieben, zwischen 80 und 125° nimmt sie linear ab und ab 125° bleibt sie konstant. Die Änderung des repräsentativen Neigungswinkels (ZWINKEL) mit dem Neigungswinkel z_{FL} der Empfängerfläche wird durch die Gleichung

$$\text{ZWINKEL} = z_{FL} \cdot 0.2 + 45.0 \quad (\text{III.17})$$

beschrieben.

Ausser diesen Annahmen mussten noch zwei Korrekturen angebracht werden, um zu zufriedenstellenden Uebereinstimmungen zwischen gemessenen und berechneten Werten zu kommen. Bei der einen handelt es sich um die Mehrfachstreuung, die bei diesen Berechnungen nicht berücksichtigt wurde. Die berechneten spektralen Verteilungen zeigten deutlich zu kleine Blauanteile. Die von Deirmendjian und Sekera (1954) angegebenen Verhältnisse der Einfach- zur Mehrfachstreuung für verschiedene Wellenlängen bei 53.1° Zenitdistanz der Sonne wurden durch eine Gleichung der

Tabelle III.4: Streuwinkelbereich für den in 45° Winkeldistanz zum Punkt senkrecht über der Empfängerfläche liegenden Ring. Mittlerer Streuwinkel und Mittel der Rayleigh- und Aerosolstreuphasen für das Maximum und Minimum des Streuwinkelbereiches für verschiedene Winkel γ zwischen der Richtung zur Sonne und der Normalen zur Empfängerfläche.

γ	Streuwinkel- bereich für 45° Ring ($^\circ$)	mittlerer Streu- winkel ($^\circ$)	mittlere Rayleigh- Streuphase ($^\circ$)	entspr. Streuwinkel ($^\circ$)	mittlere Aerosol- Streuphase ($^\circ$)	entspr. Streuwinkel ($^\circ$)
0	45	45	0.0895	45	0.131	45
20	25 - 65	45	0.0895	45	0.154	41
40	5 - 85	45	0.0895	45	0.265	30
60	15 - 105	60	0.0790	55	0.133	45
80	35 - 125	80	0.0706	65	0.0544	65
100	55 - 145	100	0.0706	115	0.0271	84
120	75 - 165	120	0.0790	125	0.0183	98
130	85 - 175	130	0.0862	132	0.0172	102

Form

$$y = a \cdot x^b + 1 \quad (\text{III.18})$$

angenähert. Für a wurde der Wert 121.59 und für b der Wert -3.764 mit einem Korrelationskoeffizienten von 0.998 bestimmt. Um die Änderung mit der Zenitdistanz der Sonne, z_s , zu berücksichtigen, wurde eine Anpassung an die Werte für 0 und 84.3° Zenitdistanz von Deirmendjian und Sekera (1954) durch die Darstellung des Exponenten b

$$b = -4 + 0.4 \cdot z_s / 90 \quad (\text{III.19})$$

erreicht.

Die andere Korrektur wurde auf Grund von Rechenvergleichen mit den von Steven und Unsworth (1979) berechneten Werten der Himmelsstrahlung auf senkrecht stehende Empfängerflächen angebracht. Steven und Unsworth (1979) berechneten die Werte aus gemessenen Verteilungen der Strahldichte des Himmels. Diese Korrektur berücksichtigt die Zunahme der Strahldichte zum Horizont hin. Die berechnete Himmelsstrahlung wird mit dem Faktor EW multipliziert, der sich nach Gleichung

$$EW = 0.3 \cdot \cos(a_s - a_{FL}) \cdot z_{FL} / 90 + 1 \quad (\text{III.20})$$

berechnet. Für Azimutdifferenzen grösser als 90° wird EW gleich 1 gesetzt. Abbildung III.6 zeigt die Werte von Steven und Unsworth (1979) in Abhängigkeit der Azimutdifferenz zwischen Empfängerfläche und Sonne und die vom Programm SOL unter Berücksichtigung der Korrektur berechneten Werte. Die berechneten Werte vor der Korrektur zeigten einen viel zu geringen Anstieg zu kleinen Azimutdifferenzen hin. In Abbildung III.7 sind Vergleiche mit den Berechnungen von Steven und Unsworth (1979) für verschiedene Neigungswinkel bei drei Azimutstellungen der Empfängerfläche dargestellt.

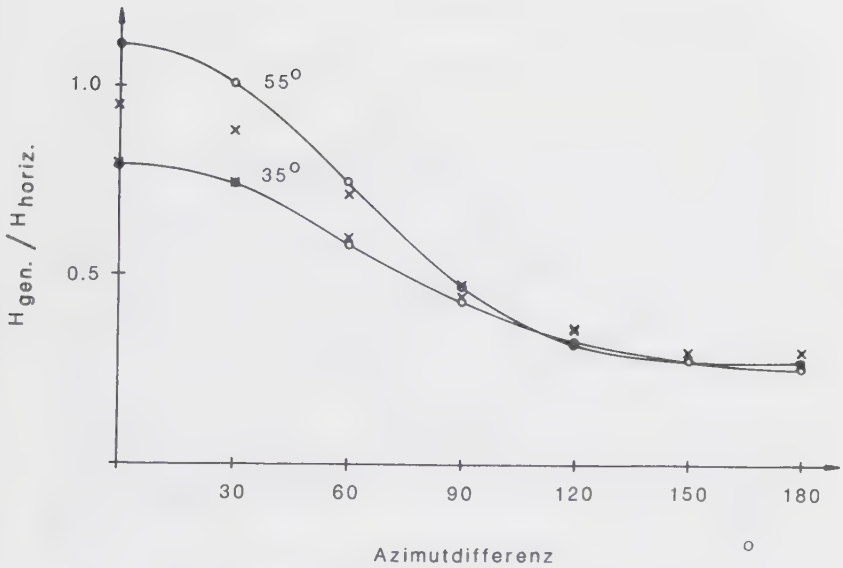


Abb. III.6: Von Steven und Unsworth (1979) angegebene (o) und mit dem Programm SOL berechnete Werte (x) für das Verhältnis der Himmelsstrahlung auf 90° geneigte Empfängerflächen zu derjenigen auf eine horizontale Empfängerfläche in Abhängigkeit der Azimutdifferenz zwischen Sonnenrichtung und Empfängerflächennormale für 35 und 55° Sonnenzenitdistanz.

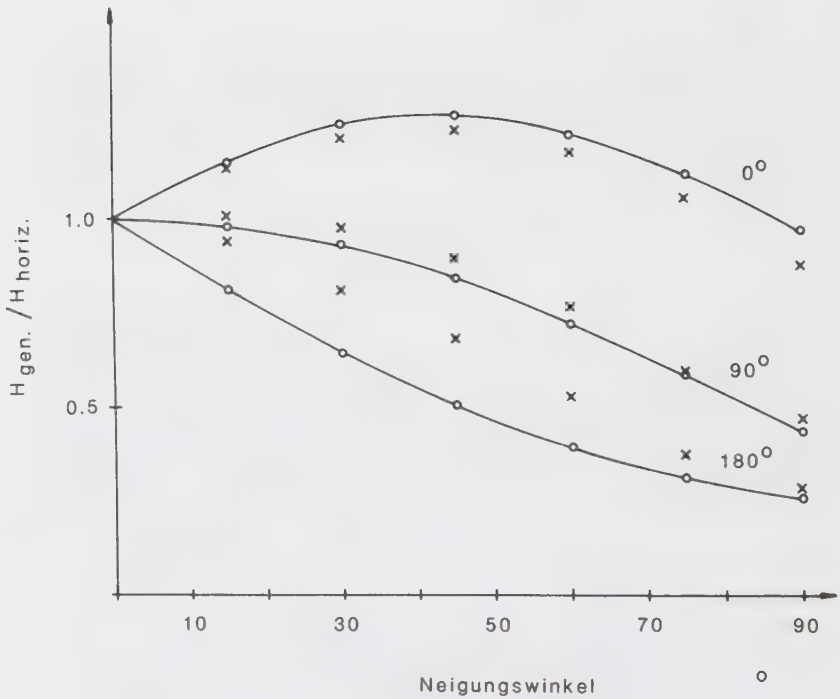


Abb. III.7: Von Steven und Unsworth (1979) angegebene (o) und mit dem Programm SOL berechnete Werte (x) für das Verhältnis der Himmelsstrahlung auf geneigte Empfängerflächen zu derjenigen auf eine horizontale Empfängerfläche für Azimutdifferenzen von 0, 90 und 180° zwischen der Sonnenrichtung und der Empfängerflächennormalen

III.3.7. Ermittlung der Transmissionskoeffizienten

Die Bestimmung der Transmissionskoeffizienten der Atmosphäre wurde, so wie sie von Selby und McClatchey (1975) im Programm LOWTRAN 3 durchgeführt wurde, übernommen, wobei aber die Berechnung in Wellenlängenschritten entsprechend dem extraterrestrischen Spektrum geschieht. Im Programm LOWTRAN 3 entsprechen die berechneten Transmissionskoeffizienten einer Mittelung über einen Wellenzahlenbereich von 20 cm^{-1} . Die Werte der Absorptionskoeffizienten sind im Bereich $700 - 3000 \text{ nm}$ für die Wasser- und "uniformly mixed gases"-Banden in Abständen von 5 cm^{-1} gespeichert, die Werte für die Ozonbanden im ultraviolett und sichtbaren Bereich in Abständen von 500 bzw. 200 cm^{-1} . Im ultravioletten und sichtbaren Bereich entspricht dies etwa den Berechnungsschritten im Programm SOL. Da der Verlauf der gespeicherten Werte kontinuierlich ist, konnten die Absorptionskoeffizienten entsprechend den Wellenlängen im Programm SOL bestimmt werden. Für diese Bereiche sind daher auch keine grösseren Abweichungen von gemessenen Werten zu erwarten.

Im infraroten Bereich entsprechen die Wellenzahlenschritte und der gemittelte Wellenzahlenbereich deutlich kleineren Wellenlängenschritten als denjenigen des Programms SOL. Die Absorptionskoeffizienten wurden deshalb über den Bereich entsprechend denjenigen des Programms SOL gemittelt. Das ist eigentlich nicht zulässig, da zuerst die Transmissionskoeffizienten bestimmt und diese anschliessend gemittelt werden müssten. Da es aber im Vergleich zur Bedeutung des Anteils der Banden an der gesamten spektralen Verteilung zu aufwendig ist, diese Bereiche in der genannten Weise zu berechnen, werden die Differenzen im Verlauf der Banden in Kauf genommen. Eine deutliche Verbesserung der Bandenformen konnte dadurch erreicht werden, dass im Zentrum der Banden, - dort wo die logarithmischen Absorptionskoeffizienten meistens einen Wert grösser als 0 haben -, die Absorptionskoeffizienten in entlogarithmierter Form gemittelt und der Logarithmus des Mittels für die Berechnung benützt wurde. Die Abbildungen III.9 und III.10 von Abschnitt III.4.1. zeigen, dass die Übereinstimmung der gemessenen und berechneten Banden bei 725 , 825 und 950 nm trotzdem gut ist.

Für die Berechnung des Rayleighschen Volumenstreuoeffizienten β zur Bestimmung der Extinktion durch die Moleküle wurde die Gleichung

$$\beta = \sigma \cdot N = 32.639 \cdot 10^{-19} \text{ cm}^3 \cdot (n_0^2 - 1)^2 \cdot 10^5 \cdot (1/\lambda^4) \cdot (p/p_0) \cdot (T_0/T) \quad (\text{III.21})$$

mit σ = Streuquerschnitt in (cm^{-2})

$$N = (p/p_0) (T_0/T) N_0 =$$

Teilchendichte beim Druck p und bei der Temperatur T in (cm^{-3})

N_0 = Teilchendichte bei NTP-Bedingungen

$(n_0^2 - 1)$ = nach Gleichung (III.12) für den Brechungsindex berechnet

λ = Wellenlänge

benützt. Sie wurde nach Penndorf (1957) bestimmt. Die von Selby und McClatchey (1975) verwendete Näherungsformel ergab bei kürzeren Wellenlängen (300 - 400 nm) Abweichungen bis 25 % gegenüber mit dieser exakteren Formel berechneten Werten. Bei Wellenlängen grösser als 1000 nm kann der Unterschied vernachlässigt werden.

III.3.8. Cosinuskorrektur der direkten Sonnenstrahlung und Integration der Himmelsstrahlung

Für die Bestimmung, der auf die Empfängerfläche auftreffende direkte Sonnenstrahlung pro Flächeneinheit $D_{FL}(\lambda)$, muss entsprechend dem Lambertschen Cosinusetz die für senkrechten Einfallswinkel berechnete, direkte Sonnenstrahlung $D(\lambda)$ mit dem Cosinus des Einfallswinkels multipliziert werden. Sie wird nach der Gleichung

$$D_{FL}(\lambda) = \cos(\gamma) \cdot D(\lambda) \quad (\text{III.22})$$

berechnet, wobei γ den Winkel zwischen der Richtung zur Sonne und der Flächennormalen bezeichnet.

Die Himmelsstrahlung $H_P(\lambda)$, die pro Steradian berechnet wurde, muss noch über den Raumwinkel, d.h. den Teil der Hemisphäre, der von der Fläche aus gesehen wird, integriert werden (Abbildung III.8). Der schraffierte Teil der Hemisphäre über der Fläche, der unter dem Horizont liegt, bringt keinen Beitrag zur Himmelsstrahlung, er wird bei der Berechnung der reflektierten Strahlung (Abschnitt III.3.9.) berücksichtigt. Das Integral

$$H(\lambda) = H_P(\lambda) \cdot \int_{\varphi} \int_{\theta} \sin \theta \cdot \cos \theta \, d\theta \, d\varphi \quad (\text{III.23})$$

ist für den jeweiligen Bereich von θ und φ zu lösen. Für horizontale Empfängerflächen erstrecken sich die Grenzen von θ von 0 bis $\pi/2$ und für φ von 0 bis 2π . Die Integration liefert die einfache Beziehung

$$H(\lambda) = H_P(\lambda) \cdot \pi. \quad (\text{III.24})$$

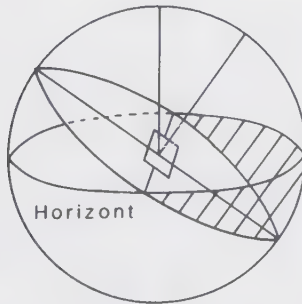


Abb. III.8: Darstellung der Raumwinkel über einer geneigten Empfängerfläche, die für den Beitrag der Himmelsstrahlung (nicht schraffierter Teil der Hemisphäre) und für den Beitrag der reflektierten Strahlung (schraffierter Teil) berechnet werden müssen.

Im Fall einer geneigten Fläche wird das Integral für die vollständige und die nur teilweise vorhandene Viertelkugel separat berechnet:

$$H(\lambda) = H_P(\lambda) \cdot \pi/2 + 2 \cdot \int_0^{\pi/2} \int_0^\theta \sin \theta \cdot \cos \theta \, d\theta \, d\varphi. \quad (\text{III.25})$$

Die obere Grenze von θ lässt sich unter Verwendung des Cosinussatzes für rechtwinklige, sphärische Dreiecke als Funktion von φ ausdrücken:

$$\theta = \arccos \theta = \arccos(\cos(\pi/2 - z_{FL}) \cdot \cos \varphi) \quad (\text{III.26})$$

mit z_{FL} = Neigungswinkel der Empfängerfläche.

Wird diese Beziehung als obere Grenze eingesetzt, berechnet sich Gleichung (III.25) zu

$$H(\lambda) = H_P(\lambda) \cdot (\pi/2) \cdot (1 + \cos(z_{FL})). \quad (\text{III.27})$$

Dieser Ausdruck gilt auch für Flächen deren Neigungswinkel grösser als 90° ist, da der Cosinus negativ wird.

III.3.9. Berechnung der reflektierten Strahlung

Die reflektierte Strahlung wird aus der direkten Sonnenstrahlung und der Himmelsstrahlung auf eine horizontale Empfängerfläche und den Reflexionseigenschaften des Bodens oder der Umgebung berechnet. Es wird wie bei Monteith (1973) angenommen, dass die Reflexionsstrahlung diffus und isotrop ist und für eine horizontal nach unten gerichtete Fläche, analog der Berechnung der Himmelsstrahlung auf eine horizontal nach oben gerichtete Fläche, aus einer Halbkugel auf die Fläche auftrifft.

Die Komponente $R_P(\lambda)$ pro Raumwinkeleinheit berechnet sich zu

$$R_F(\lambda) = r(\lambda) \cdot (D_{\text{HORIZ.}}(\lambda) \cdot 0.75 + H_{\text{HORIZ.}}(\lambda)) \quad (\text{III.28})$$

mit $r(\lambda)$ = Reflexionsgrad bei der Wellenlänge λ .

Die direkte Sonnenstrahlung wird mit einem Faktor 0.75 multipliziert, der den Umstand berücksichtigt, dass selten die ganze Umgebung besonnt ist.

Für die Integration von R_F über den von der Fläche aus gesehenen Teil der Umgebung gelten dieselben Beziehungen wie für die Himmelsstrahlung (Abschnitt III.3.8.). Wenn keine Horizonteinengung vorhanden ist, berechnet sie sich einfach aus der Differenz der Halbkugel über der Fläche und dem für die Himmelsstrahlung berechneten Teil. Es ergibt sich somit:

$$R(\lambda) = R_F(\lambda) \cdot (\pi/2) \cdot (1 - \cos Z_{FL}). \quad (\text{III.29})$$

Ist eine Horizonteinengung zu berücksichtigen, so wird die Himmelsstrahlung um den eingegebenen, prozentualen Anteil reduziert, die Reflexionsstrahlung um den entsprechenden Anteil erhöht.

III.3.10. Integration der Wellenlängenbereiche, Berechnung der Quanten, zeitliche Integration und Berechnung der transmittierten und absorbierten Strahlung

Die für die einzelnen Wellenlängen berechneten Strahlungswerte werden für verschiedene Bereiche integriert: UV von 300 - 400 nm, VIS von 400 - 750 nm, IR1 von 750 - 1350 nm, IR2 von 1350 - 3000 nm und der gesamte Bereich von 300 - 3000 nm.

Die Quanten im photosynthetisch aktiven Bereich von 400 - 700 nm (PAR) werden nach der Gleichung

$$Q = \sum_{\lambda=400}^{700} PF \cdot G(\lambda) \cdot \lambda \cdot \Delta\lambda \quad (\text{III.30})$$

mit $PF = 8.35945 \cdot 10^{-3} \mu\text{mol W}^{-1} \text{s}^{-1} \text{nm}^{-1}$
 $G(\lambda)$ = Globalstrahlung bei der Wellenlänge λ in ($\text{W m}^{-2} \mu\text{m}^{-1}$)
 λ = Wellenlänge in (nm)
 $\Delta\lambda$ = Wellenlängenintervall in (μm)

berechnet.

Zur Integration über die Zeitspanne für die die Berechnung durchgeführt wird, werden die für die verschiedenen Wellenlängenbereiche berechneten Strahlungswerte und die Quantenzahlen mit dem eingegebenen Zeitintervall multipliziert und aufsummiert. Geschieht die Berechnung von Sonnenaufgang bis Sonnenuntergang, wird eine Dämmerungszeit von einer halben Stunde, entsprechend der ungefähren Dauer der bürgerlichen Dämmerung mitberechnet. Der erste bzw. letzte berechnete Wert der diffusen Strahlung wird dabei zum Anfang resp. Ende der Dämmerung hin als linear abnehmend betrachtet.

Transmittierte und absorbierte Strahlung wird ausgehend von den berechneten spektralen Werten der Sonnenstrahlung durch Multiplikation mit dem Transmissions- bzw. Absorptionsgrad berechnet. Anschliessend wird ebenfalls die entsprechende Strahlung in den verschiedenen Wellenlängenbereichen bestimmt und die zeitliche Integration durchgeführt.

III.4. Vergleiche von Messungen und Berechnungen

III.4.1. Spektrale Verteilungen und PAR - Anteil am gesamten Spektrum

Zur Überprüfung der berechneten spektralen Verteilungen wurden mit dem in Abschnitt III.3.1. erwähnten LICOR-Spektorradiometer Globalstrahlungsspektren im Bereich 300 - 1100 nm bei horizontaler Exposition in Wellenlängenschritten von 1 nm gemessen. Die Messwerte wurden über 10 nm gemittelt. Die Messungen wurden am 19. September 1983, einem Tag mit besonders klaren Witterungsverhältnissen, auf der Dachterrasse des Instituts für Pflanzenbiologie in Zürich (8°33' ö.L., 47°23' n.B., 455 m ü. NN) durchgeführt. Gleichzeitig wurde der in Abschnitt III.4.2. gezeigte Tagesgang der Globalstrahlung mit einem horizontal exponierten Solarimeter registriert. In den Abbildungen III.9 und III.10 sind die gemessenen und berechneten Spektren entsprechend den Wellenlängenschritten eines ISCO-Datensatzes (Kapitel III.2.) dargestellt. Die Berechnungen erfolgten für die angegebenen Uhrzeiten und die geographischen Daten für Zürich. Die angegebenen Zeiten entsprechen in ihrer Reihenfolge Sonnenzenitdistanzen von 45.6, 49.9, 59.4 und 65.9°. Horizonteinengungen wurden keine angenommen, der Himmel war von der Messtelle aus gesehen weitgehend frei von irgendwelchen Abdeckungen. Die SICHT-Werte von 23 und 25 km ergaben sich aus dem Vergleich der gemessenen Solarimeterwerten und den berechneten Bestrahlungsstärken (Abschnitt III.4.2.). Wie die Abbildungen III.9 und III.10 zeigen, ist die Übereinstimmung für diesen Bereich der Sonnenzenitdistanz gut. Ob die zwischen 1000 und 1100 nm höheren Werte der Berechnung tatsächlich zu hoch sind, kann aus diesen Messungen nicht geschlossen werden, da die Spektorradiometerwerte, wie sich auch bei Messungen von optischen Eigenschaften zeigte, in diesem Bereich eher mit einem grösseren Fehler als 5% behaftet sind.

Da es in Zürich wegen der geographischen Lage nicht möglich ist, Messungen bei Sonnenzenitdistanzen, die kleiner als etwa 25° sind, durchzuführen, wurde für einen Vergleich die von Gates (1966) berechnete spektrale Verteilung der Globalstrahlung für 0° Zenitdistanz (entspricht Luftmasse 1.0) herangezogen. Um die

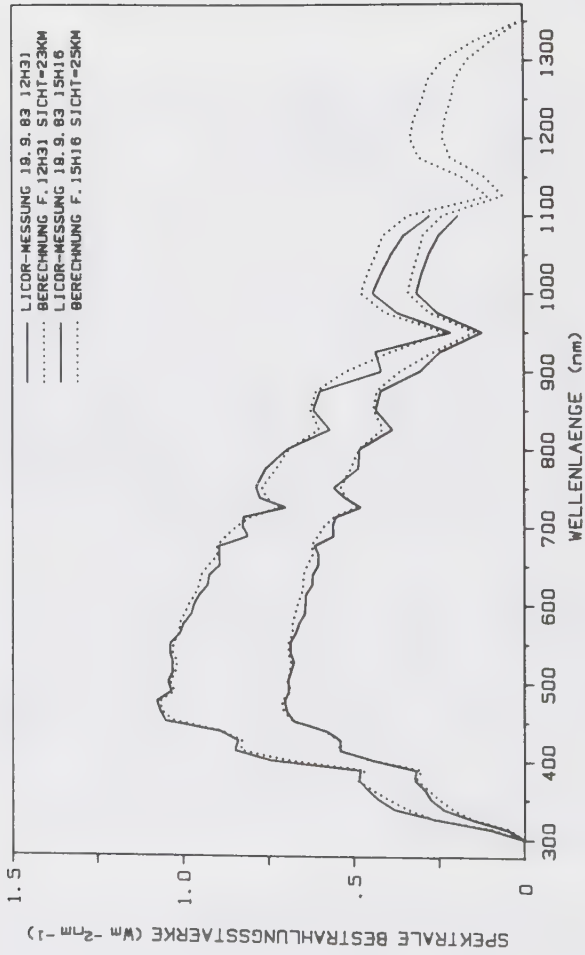


Abb. III.9: Gemessene und berechnete spektrale Verteilungen der Globalstrahlung auf eine horizontale Empfängerfläche für 12³¹ und 15¹⁶ Uhr am 19. September 1983 in Zürich

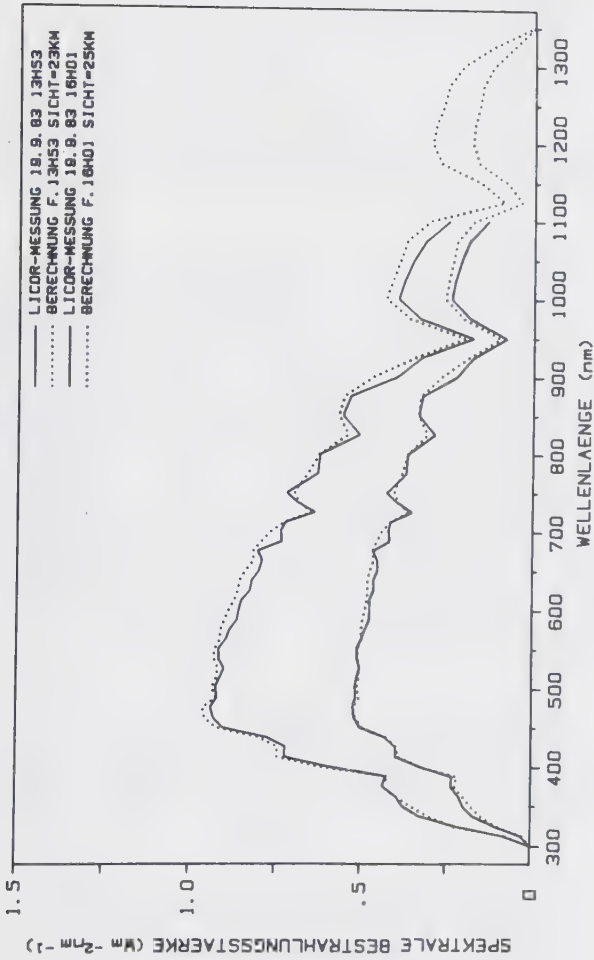


Abb. III.10: Gemessene und berechnete spektrale Verteilungen der Globalstrahlung auf eine horizontale Empfängerfläche für 13⁰³ und 16⁰¹ Uhr am 19. September 1983 in Zürich

Übereinstimmung beurteilen zu können, wurden die Berechnungen auch für die Luftmassen 1.5 (48.3° Zenitdistanz) und 4.0 (75.8° Zenitdistanz) ausgeführt. Die drei Spektren wurden für Meereshöhe und 23 km Sichtweite berechnet. Die Ergebnisse sind in der Abbildung III.11 dargestellt. Die etwas niedrigeren Werte bei Gates (1966) ab 500 nm sind, mindestens zum Teil, darauf zurückzuführen, dass Gates für die Entstehung der Himmelsstrahlung eine reine Rayleighatmosphäre annimmt. Die Form der Wasserdampf- und Kohlendioxidbanden sind bei Gates sicher ungenauer, da seine diesbezüglichen Berechnungsgrundlagen weniger detailliert sind.

Eine Überprüfung der berechneten spektralen Verteilungen der Himmelsstrahlung ist schwierig. Gemessene spektrale Verteilungen mit den für eine vergleichende Berechnung notwendigen Angaben sind in der Literatur kaum zu finden. Die Messungen von Hess (1939) wurden für kleine Raumwinkel (etwa 5° Öffnungswinkel) an verschiedenen Stellen der Himmelshalbkugel durchgeführt und werden nicht in Energieeinheiten angegeben. Um einen Eindruck zu erhalten, ob die berechneten spektralen Verteilungen einigermaßen gemessenen entsprechen, wurden für zwei Sonnenzenitdistanzen und entsprechend den übrigen Angaben von Hess (1939) die Himmelsstrahlungen berechnet und bei 500 nm normiert. Die beiden Spektren sind in Abbildung III.12, zusammen mit in gleicher Weise normierten Werten von Hess (1939), zu sehen. Es kann aus der Darstellung entnommen werden, dass keine grösseren Differenzen vorhanden sind.

Der Anteil der photosynthetisch aktiven Strahlung (PAR) am gesamten Wellenlängenbereich von 300 - 3000 nm ist im Zusammenhang mit dieser Arbeit von besonderem Interesse. Die von Stanhill und Fuchs (1977) gemessenen Werte für η , bei ihnen durch das Verhältnis

$$\eta = \frac{\int_{220}^{686} G(\lambda) d\lambda}{\int_{220}^{3000} G(\lambda) d\lambda} \quad (\text{III.31})$$

definiert, wurden mit dem Verhältnis der in den entsprechenden Wellenlängenbereichen berechneten Werten verglichen. Es wurden

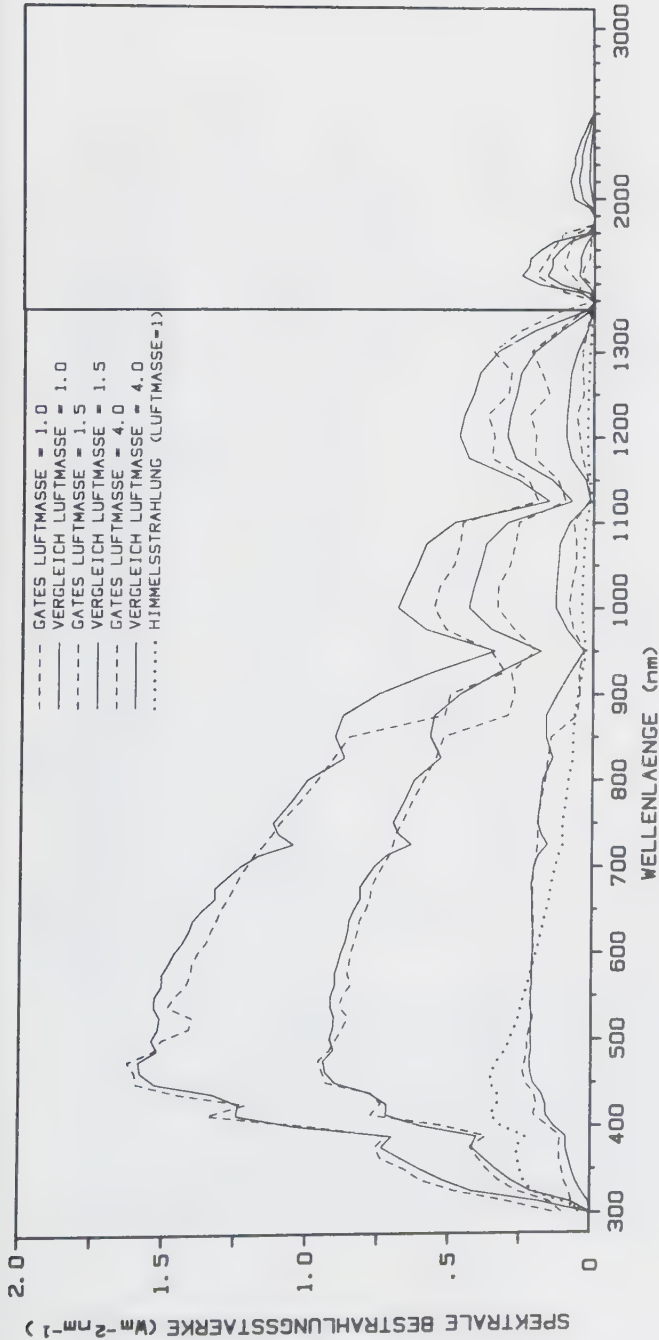


Abb. III.11: Von Gates (1966) und mit dem Programm SOL berechnete spektrale Verteilungen der Globalstrahlung auf eine horizontale Empfängerfläche für die Luftmassen 1.0, 1.5 und 4.0, die den Sonnenzenitdistanzen 0, 48.3 bzw. 75.8° entsprechen. Zusätzlich eingetragen ist die für 0° Zenitdistanz berechnete Himmelstrahlung

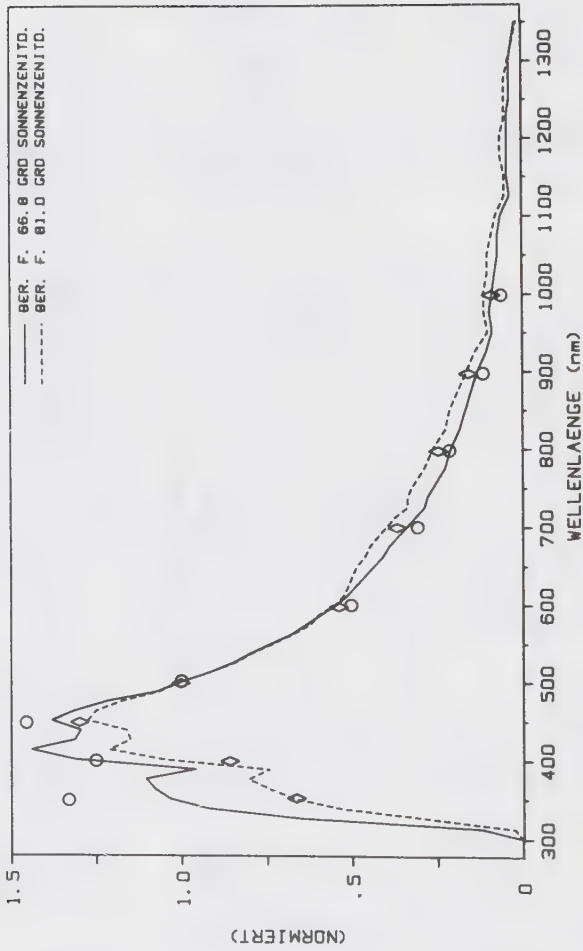


Abb. III.12: Berechnete spektrale Verteilungen der Himmelsstrahlung für 66.8 und 81.0° Sonnenzenitdistanz, sowie von Hess (1939) gemessene Werte (O) bzw. (◊) für dieselben Zenitdistanzen. Die Empfängerfläche ist in Richtung des Sonnenvertikals geneigt und in 90° Winkeldistanz zur Sonne. Die Spektren sind bezügl. des Wertes bei 500 nm normiert.

Tagesgänge für Bet Dagan ($34^{\circ}49'$ ö.L., $32^{\circ}00'$ n.B., 35 m ü. NN) gerechnet und die Verhältnisse bei verschiedenen Sonnenzenitdistanzen gebildet. Die für zwei verschiedene Trübungen berechneten Werte sind in Abbildung III.13 zusammen mit den Mittelwerten nach Stanhill und Fuchs (1977) dargestellt. Zusätzlich sind noch Berechnungen mit dem in III.4.2. für den Tagesgang in der Welwitschia-Vlakte (zentrale Namibwüste) verwendeten, für geringe Luftfeuchten und höhere Temperaturen modifizierten Atmosphärenmodell "MODMISU" eingetragen. Die Berechnungen stimmen für Zenitdistanzen bis etwa 75° gut mit den gemessenen Werten überein. Für grössere Zenitdistanzen liegen sie offenbar etwas zu tief. Wie die Abbildung zeigt, ergeben sich keine grossen Änderungen für verschiedene Trübungen und unterschiedliche klimatische Verhältnisse, ein Resultat, das von Szeicz (1975) bestätigt wird.

III.4.2. Tagesgang der Globalstrahlung und Abhängigkeit der Himmelsstrahlung von der Sonnenzenitdistanz

Abbildung III.14 zeigt den mit einem horizontal exponierten Solarimeter auf dem Dach des Instituts für Pflanzenbiologie gemessenen Globalstrahlungsverlauf vom 19. September 1983. Ebenfalls in die Abbildung eingetragen sind die berechneten Bestrahlungsstärken für diesen Tag unter der Annahme von Sichtweiten von 23 und 30 km. Zur Kulminationszeit (12h19) liegen die Messwerte in der Nähe der für 23 km Sichtweite berechneten Kurve, am Nachmittag wird die Sichtweite grösser, die Messwerte liegen im Bereich der Kurven für 25 und 30 km. Die Unterschiede sind in der Abbildung III.14 nicht deutlich zu sehen, sie liegen jedoch mit 2 % über der Messgenauigkeit des Solarimeters, das etwa 1 % beträgt.

In Abbildung III.15 ist ein von von Willert et al. (1981) in der Welwitschia-Vlakte ($15^{\circ}03'$ ö.L., $22^{\circ}36'$ s.B., 450 m ü. NN) gemessener Tagesgang der Globalstrahlung zu sehen. Die Messung fand am 25. August 1981 mit einem horizontal exponierten Solarimeter statt. Die Lufttemperatur variierte zwischen 25 und 30°C , die relative Luftfeuchte 20 und 15 %. Für die Berechnung wurden die Temperatur- und Feuchtwerte des "midlatitude summer" - Modells (McClatchey et al. 1971) in der untersten Schicht

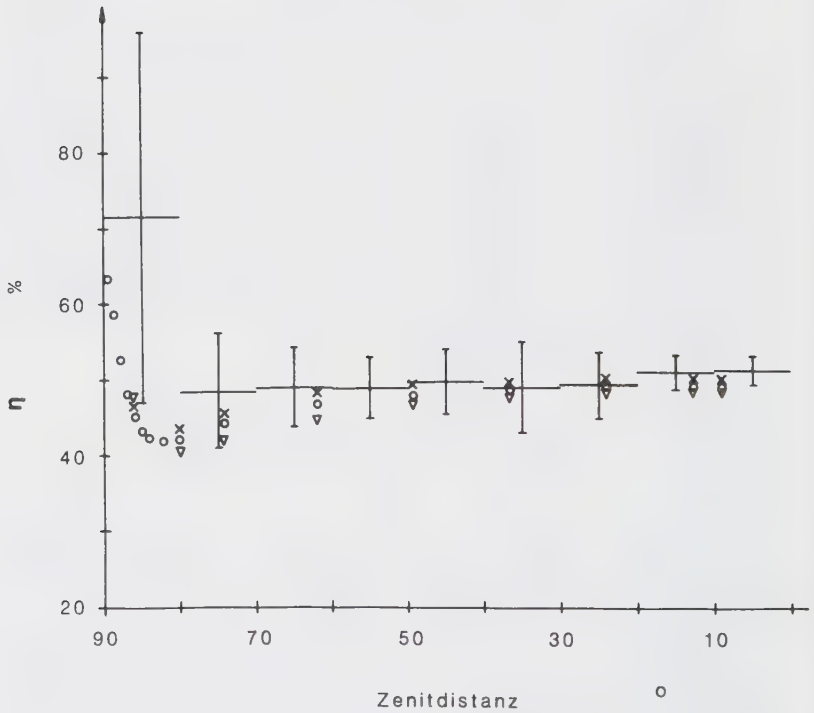


Abb. III.13: Von Stanhill und Fuchs (1977) gemessene Verhältnisse η des PAR-Anteils zur gesamten Globalstrahlung mit ihrer Schwankungsbreite für 10° -Bereiche der Sonnenzenitdistanz. Die mit dem Programm SOL berechneten Werte wurden für die Atmosphärenmodelle MIDSUM (∇ für 12 km, $\times$ für 50 km Sichtweite) und MODMISU (o für 23 km Sichtweite) bestimmt

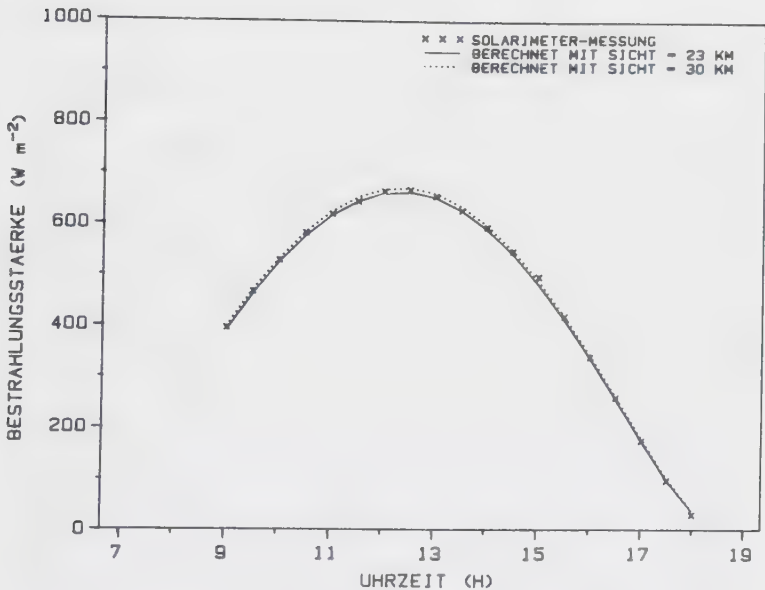


Abb. III.14: Gemessener und für zwei Sichtweiten (23 und 30 km) berechneter Tagesgang der Globalstrahlung auf eine horizontale Empfängerfläche am 19. September 1983 in Zürich.

entsprechend diesen Werten abgeändert und in den 6 darüberliegenden Schichten den Werten des ursprünglichen Modells mit steigender Höhe angenähert. Die achte und die darauffolgenden Schichten blieben unverändert. Dieses Atmosphärenmodell wurde auch bei anderen Berechnungen (Abschnitte III.4.1. und III.4.5.) verwendet, es trägt den Namen "MODMISU". Die Berechnung für eine Sichtweite von 50 km brachte eine praktisch perfekte Übereinstimmung mit den gemessenen Werten, sie ist ebenfalls in Abbildung III.15 eingetragen. Dieses Ergebnis macht deutlich, dass Globalstrahlungswerte sehr gut berechnet werden können, wenn der Wasser- und der Aerosolgehalt der Atmosphäre gering, d.h. die Trübung klein ist. Die Ergebnisse für die Welwitschia-Vlakte zeigt, dass nicht nur die absoluten Werte für die Globalstrahlung während des ganzen Tages übereinstimmen, sondern auch die in

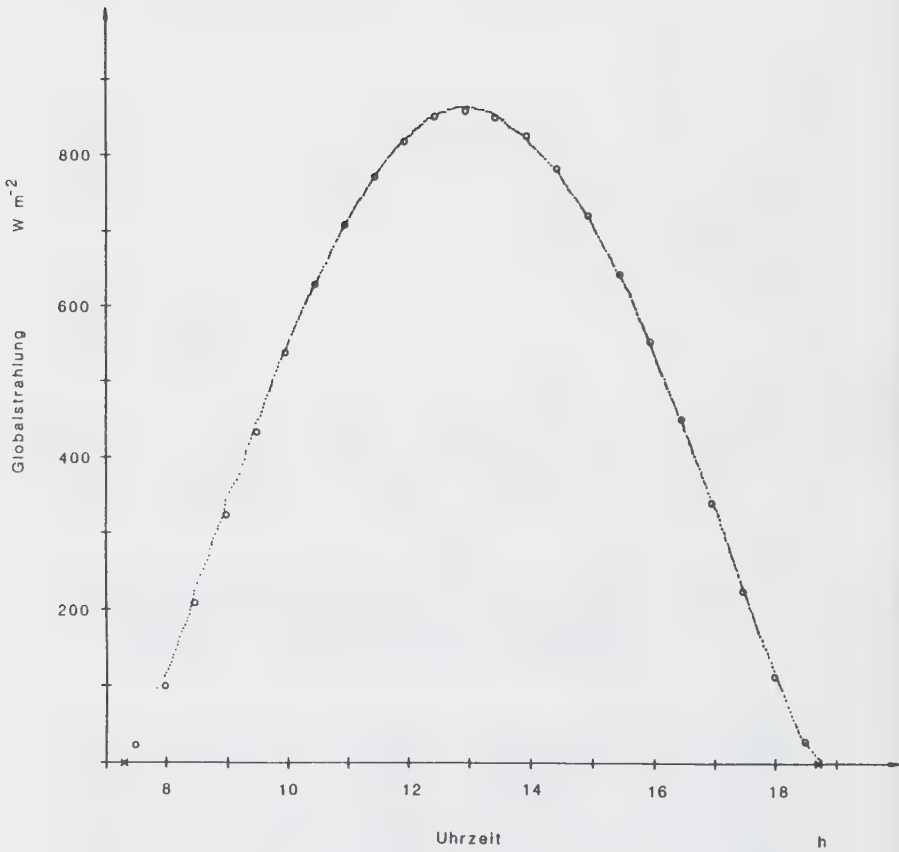


Abb. III.15: Gemessener und berechneter (o) Tagesgang der Globalstrahlung auf eine horizontale Empfängerfläche am 25. August 1981 in der Welwitschia-Vlakte (zentrale Namibwüste)

Abschnitt III.3.2. dargestellten Berechnungen zur Bahn der Sonne an der Himmelshalbkugel korrekt ausgeführt werden.

Um die Berechnung der Himmelstrahlung überprüfen zu können, wurden mit Hilfe eines nach Coulson (1975) konstruierten Schattenringes die Himmelsstrahlung auf eine horizontale Empfängerfläche bei verschiedenen Sonnenzenitdistanzen mit dem Solarimeter gemessen. Gleichzeitig wurde mit einem anderen Solarimeter desselben Typs und der gleichen Exposition die Globalstrahlung bestimmt. Die Messungen wurden ebenfalls auf dem Dach des Institutes in Zürich durchgeführt. Die Messwerte der Himmelsstrahlung mussten wegen der Abschirmung des Schattenringes korrigiert werden. Dies geschah nach den Empfehlungen von Drummond (1956). In Abbildung III.16 sind die für den 18. August 1982 und den 14. Oktober 1982 bestimmten Werte zusammen mit den Globalstrahlungswerten in Abhängigkeit der Sonnenzenitdistanz dargestellt. Ebenfalls eingetragen sind einige von Kalitin in Pavlovsk (in: Kondratyev, 1969) gemessene Werte. An beiden Messtagen herrschten klare Witterungsverhältnisse, am 14. Oktober waren einzelne Wolken zu beobachten. Die Berechnungen wurden für Sichtweiten von 15, 23 und 50 km am 18. August und für 50 km am 14. Oktober durchgeführt. Sie sind als Kurven in Abbildung III.16 eingetragen. Ein Vergleich der berechneten Global- und Himmelsstrahlungsverläufe derselben Sichtweite mit den gemessenen Werten des entsprechenden Strahlungstyps zeigt, dass Abweichungen von 10 - 20 % bei der Himmelsstrahlung für einzelne Werte durchaus möglich sind. Es können sogar bedeutend grössere Differenzen auftreten, wenn wie das für den 14. Oktober der Fall ist, Bewölkung die Himmelsstrahlung beeinflusst. Ein in Abbildung III.16 nicht eingezeichneter Messwert bei 34.7° Zenitdistanz beträgt 137 W m^{-2} , was vermutlich auf erhöhte Reflexionen an Wolken zurückzuführen ist. Die Abhängigkeit von der Zenitdistanz wird jedoch durch die in Abschnitt III.3.6. besprochenen Annahmen für klare Verhältnisse gut wiedergegeben. Es kann auch angenommen werden, dass dies bei unterschiedlichen Trübungsverhältnissen, aber bei Abwesenheit von Bewölkung der Fall ist. Steven (1977) stellte an Hand von gemessenen Himmelsstrahlungsverteilungen und ihrer Änderung mit der Trübung fest, dass der absolute Wert der Himmelsstrahlung zwar ändert, aber die Verteilungen für die Berechnung der Himmelsstrahlung auf irgendeine geneigte Fläche als gleichbleibend angenommen werden kann.

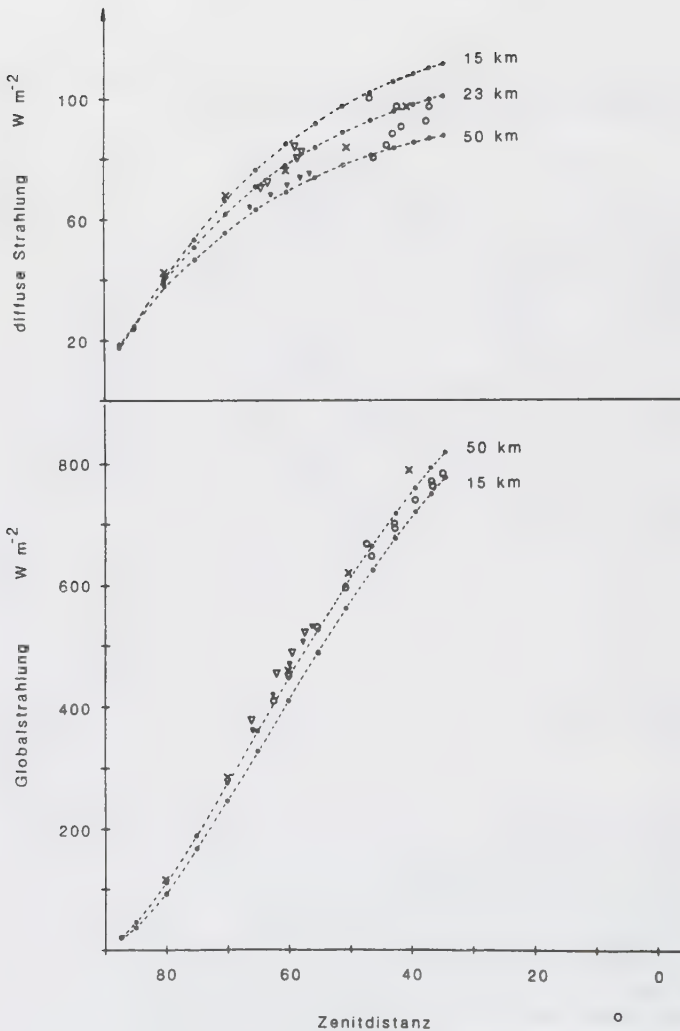


Abb. III.16: Am 18. August 1982 (○) und am 14. Oktober 1982 (▼) gemessene und für verschiedene Sichtweiten (15, 23 und 50 km) berechnete (●) bzw. (▼) diffuse Strahlung und Globalstrahlung auf eine horizontale Empfängerfläche in Abhängigkeit der Sonnenzenitdistanz. Zusätzlich eingetragen sind von Kalitin in Pavlovsk (Kondratyev, 1977) gemessene Werte (x)

III.4.3. Globalstrahlung auf geneigte Flächen

Bestrahlungsstärken der Globalstrahlung auf geneigte Flächen wurden mit Hilfe eines Koordinatentisches, auf dem das Solarimeter angebracht werden konnte, gemessen. Mit Hilfe zweier mit Winkелеinteilungen versehenen Achsen konnte die Empfängerfläche des Solarimeters in eine beliebige Azimutrichtung mit einem Neigungswinkel bis 90° positioniert werden. Die Messungen wurden im Sonnenvertikal (Grosskreis durch Sonne und Zenit) in der zur Sonne entgegengesetzten Richtung (Azimutdifferenz 180°) durchgeführt. Gleichzeitig wurde mit einem Solarimeter desselben Typs die auf eine horizontale Fläche einfallende Globalstrahlung registriert. Für den Vergleich der Messwerte auf geneigte Flächen mit berechneten Werten wurde die Sichtweite so gewählt, dass die für horizontale Flächen berechneten Werte mit den gemessenen Werten möglichst gut übereinstimmen. Anschliessend wurden die Berechnungen für die geneigten Flächen mit den auf diese Weise bestimmten Sichtweiten und dem Datensatz ALLSOIL für die Berechnung der reflektierten Strahlung durchgeführt. Die Ergebnisse zeigt Abbildung III.17 zusammen mit den gemessenen und berechneten Werten für die horizontale Empfängerfläche. Die Differenzen zwischen den gemessenen und berechneten Werten betragen für die horizontale Empfängerfläche im Maximum 2 %, für die geneigten Flächen bis 9 %, ausser in einem Fall, wo nur noch diffuse Strahlung das Solarimeter erreichte. Dort beträgt die Differenz etwa 30 %. Die Position des Solarimeters konnte sowohl für das Azimut wie für den Neigungswinkel auf etwa 1° genau eingestellt werden. Je nach Einfallswinkel der direkten Sonnenstrahlung ist dadurch eine Unsicherheit von praktisch 0 bis ± 5 % bei 75° zu erwarten. Von 75° bis 90° steigt sie sogar auf ± 40 %. Unter Berücksichtigung der angegebenen Unsicherheiten und der der Berechnung der reflektierten Strahlung anhaftenden Unsicherheit, kann die Übereinstimmung als gut bewertet werden.

Zur weiteren Ueberprüfung wurden die von Kondratyev und Federova (1977) angegebenen Verhältnisse der Globalstrahlung auf geneigte Flächen zu derjenigen auf eine horizontale Fläche mit den entsprechend berechneten Verhältnissen verglichen. Die Messungen wurden am 31. Juli 1956 in Karadag (Krim) bei einer Sonnenzenitdistanz von 62° bei klarem Himmel durchgeführt. Die

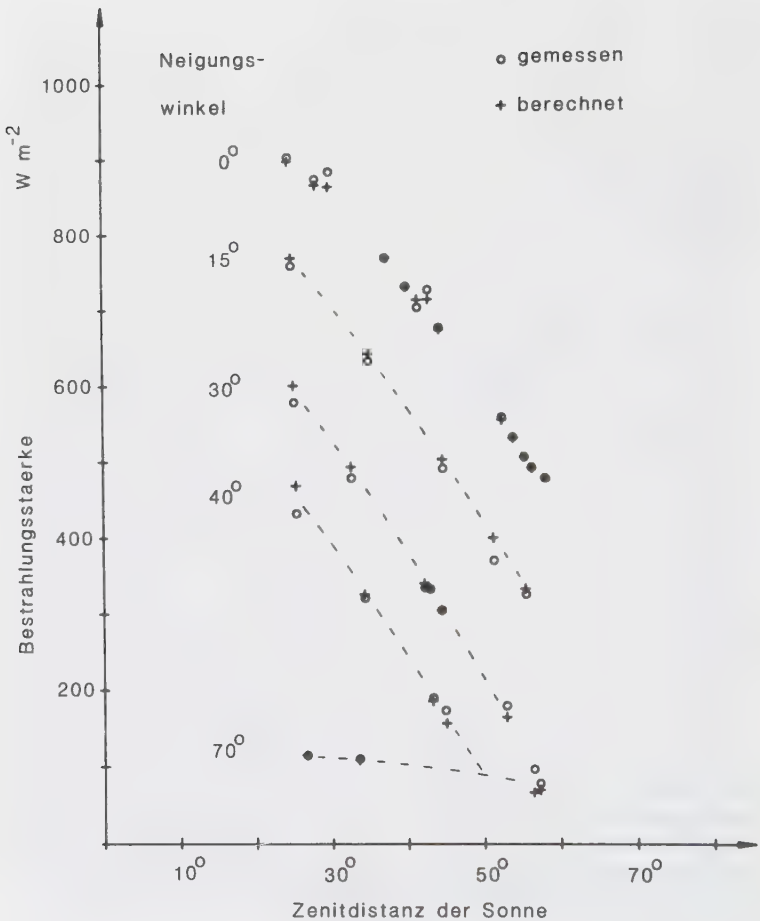


Abb. III.17: In Zürich gemessene und berechnete Bestrahlungsstärken der Globalstrahlung für verschiedene im Sonnenvertikal geneigte Empfängerflächen (Azimutdifferenz 180° zur Sonne) in Abhängigkeit von der Zenitdistanz der Sonne

gemessenen und berechneten Werte zeigt Abbildung III.18. Bei den Berechnungen wurde 0 m ü. NN, 23 km Sichtweite und ALLSOIL als Reflexionsdatensatz angenommen. Für 90° und 180° Azimutdifferenz sind die Unterschiede zwischen Messung und Berechnung klein. Bei 0° sind die berechneten Werte um etwa 10 % höher. Es wird angenommen, dass dies eher auf die berechnete Himmelsstrahlung zurückzuführen ist als auf die reflektierte Strahlung, da die Differenz bei allen Neigungswinkeln vorhanden ist. Andererseits ist im Vergleich in Abbildung III.7 (Werte von Steven und Unsworth, 1979) eher die umgekehrte Tendenz festzustellen. Im übrigen gilt auch die Bemerkung von Abschnitt III.4.4. über die für diese Berechnungen nicht ausreichenden Angaben der Autoren zu den Messbedingungen.

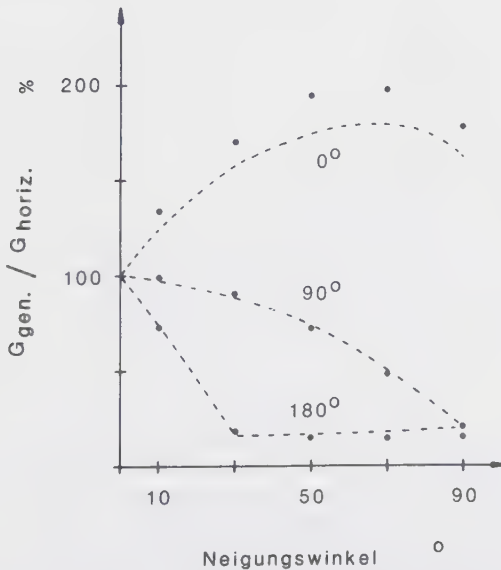


Abb. III.18: Von Kondratyev und Federova (1977) angegebene (---) und mit dem Programm SOL berechnete Verhältnisse (●) der Globalstrahlung auf geneigte Flächen zu derjenigen auf eine horizontale Fläche für Azimutdifferenzen von 0, 90 und 180° zwischen Sonnenrichtung und Empfängerflächennormale.

III.4.4. Diffuse Strahlung und Reflexionsanteil geneigter Flächen

Abbildung III.19 zeigt von Kondratyev und Federova (1977) angegebene Verhältnisse der diffusen Strahlung auf geneigte Flächen zu derjenigen auf horizontale Flächen. Die Messungen wurden in Karadag (Krim) am 19. Juni 1956 bei einer Sonnenzenitdistanz von 56° und klarem Himmel durchgeführt. Die übrigen Annahmen bei den Berechnungen sind dieselben wie bei der Berechnung der Globalstrahlung für diesen Ort (Abschnitt III.4.3.). Die Ergebnisse der Berechnung der diffusen Strahlung sind ebenfalls in Abbildung III.19 dargestellt.

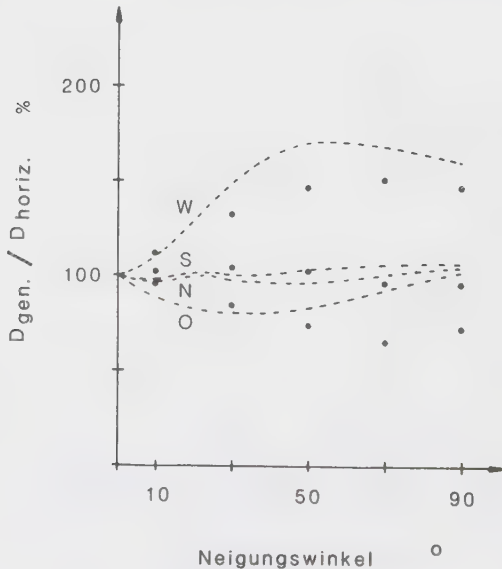


Abb. III.19: Von Kondratyev und Federova angegebene (---) und mit dem Programm SOL berechnete Verhältnisse (•) der diffusen Strahlung auf geneigte Flächen zu derjenigen auf eine horizontale Fläche in westlicher, südlicher, nördlicher und östlicher Richtung.

In derselben Arbeit von Kondratyev und Federova (1977) geben die Autoren die aus gemessenen Verteilungen der diffusen Strahlung berechneten Verhältnisse der reflektierten Strahlung zur gesamten diffusen Strahlung für verschiedene Neigungswinkel und Azimute der Empfängerfläche an. Die Berechnungen für 42° Sonnenzenitdistanz und 0 m ü. NN wurden für die Reflexionsdatensätze ALLSOIL und REDDES durchgeführt. Die Werte von Kondratyev und Federova (1977) und die vom Programm SOL berechneten Werte sind in Abbildung III.20 dargestellt. Die Übereinstimmung der gerechneten Werte mit den Werten von Kondratyev und Federova (1977) ist als gut zu betrachten.

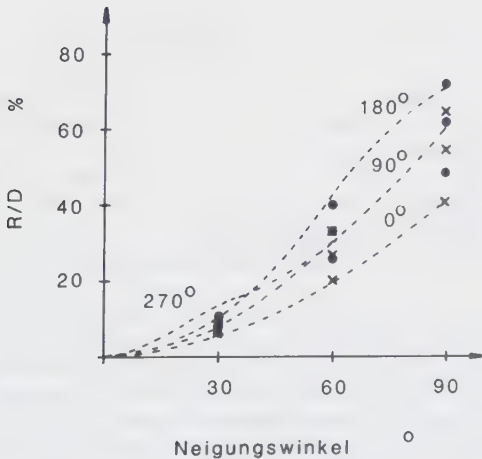


Abb. III.20: Von Kondratyev und Federova (1977) angegebene (---) und mit dem Programm SOL berechnete Verhältnisse (● mit Reflexionsdatensatz ALLSOIL, x mit REDDES) der reflektierten Strahlung zur gesamten diffusen Strahlung in Abhängigkeit des Neigungswinkels der Empfängerfläche für Azimutdifferenzen von 0, 90, 270 und 180° zwischen Sonnenrichtung und Empfängerflächennormale.

Die gerechneten Verhältnisse der diffusen Bestrahlungsstärken in Abbildung III.19 zeigen zum Teil grössere Abweichungen von den von Kondratyev und Federova (1977) gemessenen Werten. Das ist vor allem in westlicher Richtung (0° Azimutdifferenz) und entgegengesetzt zur Sonne bei grösseren Neigungswinkeln der Fall. Es ist jedoch schwierig zu beurteilen, auf welche der beiden Komponenten, Himmelsstrahlung oder reflektierte Strahlung, das zurückzuführen ist, da für die Berechnung die Angaben von Kondratyev und Federova (1977) zu den Messbedingungen (Sichtverhältnisse, Art der Umgebung) für einen schlüssigen Vergleich eigentlich zu spärlich sind.

III.4.5. Anwendungsbeispiel: Strahlungsgenuss junger und älterer Blätter von *Aloe dichotoma* Masson

Die in diesem Abschnitt beschriebenen Beobachtungen und Messungen an *Aloe dichotoma* Masson, wurden von Eller (1979a) bei Springbock, Republik Südafrika ($17^\circ 58'$ ö.L., $29^\circ 41'$ s.B., 920 m ü. NN) gemacht. Die an dieser Pflanzenart durchgeführten Untersuchungen erwiesen sich als sehr geeignet, die Anwendung des Rechenprogramms im Zusammenhang mit einer ökophysiologischen Problemstellung an einem konkreten Beispiel zu prüfen.

Junge Pflanzen von *Aloe dichotoma* weisen typischerweise eine nahezu senkrechte Blattstellung auf im Gegensatz zu den älteren Pflanzen, deren Blätter mehr oder weniger horizontal ausgerichtet sind. Der Verlauf der Bestrahlungsstärken im Tagesgang muss sich zwangsläufig bei den beiden Blattstellungen unterscheiden. Es ist anzunehmen, dass dies auch einen veränderten Strahlungsgenuss der jüngeren und älteren Blätter zur Folge hat.

Am 21. Dezember 1979, also bei Sommersonnenwende, wurden am Morgen und am Mittag Messungen zu den klimatischen Umgebungsparametern der Pflanzen und am Mittag Messungen der spektralen Verteilungen der Globalstrahlung mit dem Spektroradiometer SR (ISCO) durchgeführt. Die Witterungsverhältnisse waren am Morgen klar, aber am frühen Nachmittag zog Bewölkung auf. Die in Abbildung III.21 gezeigten Messwerte des horizontal exponierten Solarimeters und des in gleicher Weise exponierten Quantenfühlers zeigen das entsprechende Verhalten.

Die Lufttemperatur betrug 34°C um 9 Uhr morgens und 39°C um 12h30, die relative Luftfeuchte 10 bzw. 12.5 %.

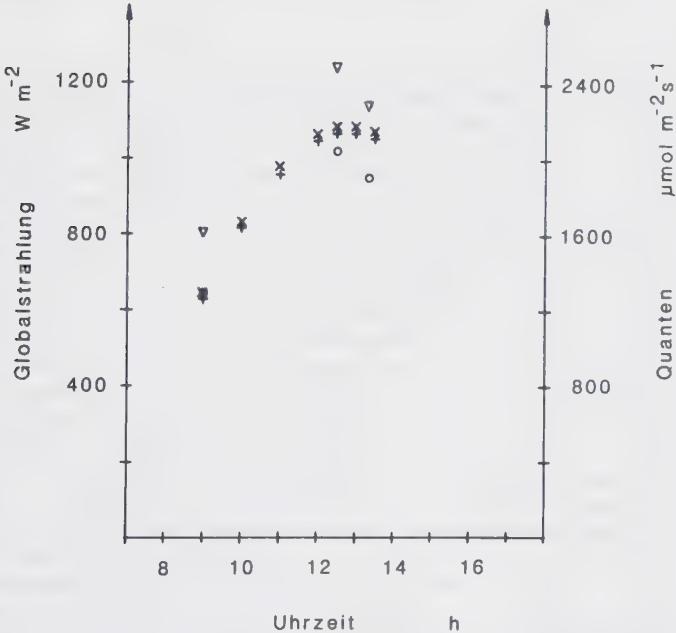


Abb. III.21: Gemessene (o) und berechnete (x) Globalstrahlungswerte sowie gemessene (v) und berechnete (+) Quanten im PAR-Bereich für den 21. Dezember 1979 bei Springbok, Republik Südafrika

Für die Berechnung der Bestrahlungsstärken wurde das Atmosphärenmodell "midlatitude summer" entsprechend der gemessenen Lufttemperaturen und -feuchten abgeändert, in derselben Weise wie das in Abschnitt III.4.2. für die Berechnungen zu den Messungen in der Welwitschia-Vlakte beschrieben wurde. Die berechneten Bestrahlungsstärken für 15 km und 23 km Sichtweite sind zusammen mit den gemessenen Werten in Abbildung III.21 zu sehen. Die nachfolgend beschriebenen

Berechnungen der spektralen Verteilungen und der absorbierten Globalstrahlung im Tagesgang wurden für 15 km Sichtweite durchgeführt.

Von einer jungen und einer älteren Pflanze wurden auch die optischen Eigenschaften der Blattoberseiten und -unterseiten, wie bei Eller (1972), gemessen. Da sich die Messungen auf den Bereich 400 - 1500 nm erstreckten und die Werte in Schritten von 12.5 und 25 nm gemessen wurden, mussten die Absorptionseigenschaften für die Verwendung im Programm SOL bis 220 und 3000 nm erweitert und für die Werte zwischen den Messwerten linear interpoliert werden. Von 220 - 400 nm wurde ein konstanter Verlauf angenommen, der dem Wert bei 400 nm entspricht, wie das bei Eller (1979b) für den Bereich 300 - 400 nm beschrieben ist. Von 2300 bis 3000 nm wurde ein Absorptionsgrad von 0.96 angenommen und von 1500 bis 2300 nm ein linearer Anstieg vom gemessenen Wert bei 1500 bis zum Wert 0.96 bei 2300 nm. Der Bereich von 300 - 1350 nm ist jeweils für die Ober- und Unterseiten in den Abbildungen III.22 und III.23 dargestellt. Für den Vergleich der gemessenen spektralen Verteilungen am Standort mit berechneten wurden für die Bestimmung der reflektierten Strahlung die Reflexionseigenschaften der Blattoberseite der älteren Pflanze und diejenigen der Blattunterseite der jüngeren Pflanze benötigt. Die Werte von 220 - 400 nm wurden ebenfalls konstant angenommen und für den Bereich 1550 - 3000 nm wurden die Werte der durchschnittlichen Reflexionskurve ALLVEG für Vegetationen (Kapitel III.2) benutzt.

Mit dem Spektroradiometer SR (ISCO) wurden drei Spektren in verschiedenen Richtungen gemessen. Das erste unmittelbar über der Oberfläche eines horizontal exponierten Blattes einer älteren Pflanze nach oben, das zweite am selben Blatt auf der Unterseite nach unten und das dritte an einer jungen Pflanze, entsprechend der Ausrichtung der Blattoberseiten, d.h. in senkrechter Stellung, zwischen zwei Blättern gegen das Innere der Blattrosette. Die gemessenen spektralen Verteilungen sind in Abbildung III.24 für das ältere Blatt und in Abbildung III.25 für das jüngere Blatt dargestellt. Die Berechnungen für die jeweiligen Zeitpunkte der Messungen geschahen unter den folgenden Annahmen:

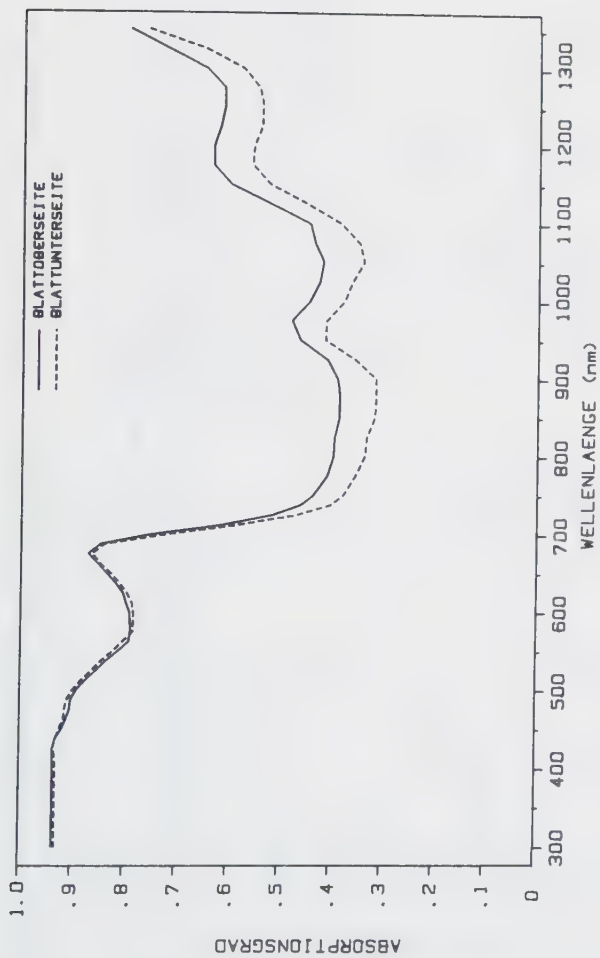


Abb. III.22: Absorptionsgrad der Ober- und Unterseite eines jungen *Aloe dichotoma* Blattes

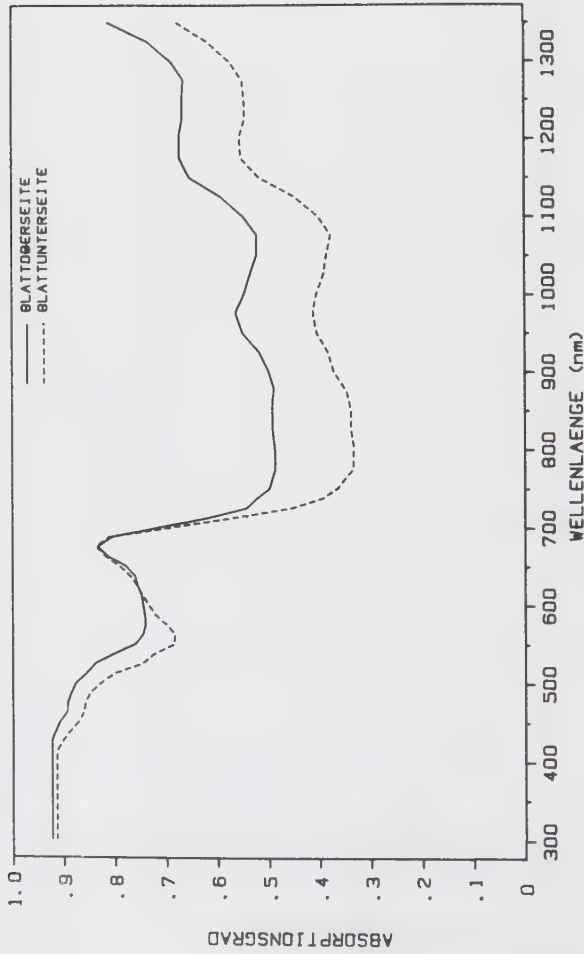


Abb. III.23: Absorptionsgrad der Ober- und Unterseite eines älteren *Aloe dichotoma* Blattes

- älteres Blatt Oberseite:
keine Horizonteinengung
- älteres Blatt Unterseite:
15% Horizonteinengung,
für die Berechnung der Reflexionsstrahlung,
Reflexionseigenschaften der Blattoberseiten der älteren
Blätter, Faktor für die Reflexion der direkten Sonnen-
strahlung 0.62 statt 0.75 (Abschnitt III.3.9.)
- junges Blatt Oberseite:
Neigungswinkel 90° , Azimut 30° (entspr. Messrichtung),
je zur Hälfte an der Reflexionsstrahlung beitragend,
Reflexionseigenschaften Blattunterseiten, Faktor 0.5
für die Reflexion der direkten Sonnenstrahlung,
50% Horizonteinengung,
Reflexionsdatensatz ALLSOIL, Faktor 0.75 für die
Reflexion der direkten Sonnenstrahlung,
15% Horizonteinengung.

Die unter diesen Annahmen berechneten Spektren sind ebenfalls in den Abbildungen III.24 und III.25 zu sehen. Vorallem bei der Messung am älteren Blatt senkrecht nach unten, werden die durch die Blätter bedingten Eigenschaften der reflektierten Strahlung, insbesondere der Anstieg bei 700 nm, deutlich.

Für die Berechnung der Tagesgänge der Bestrahlungsstärken wurden die sukkulenten Blätter durch eine langgestreckte dreieckige Pyramide beschrieben, wobei eine breitere Seite der Oberfläche entspricht und zwei gleich gestaltete, schmälere Seiten der Unterseite. Die Winkel, in denen die Dreieckseiten zueinander stehen, wurden aus den an der dicksten Stelle gemessenen Blattdicke und der Blattbreite bestimmt. Sowohl für das Blatt der jungen wie auch der älteren Pflanze wurde dieselbe Position an der Pflanze in nordöstliche Richtung (Azimut = 270°) angenommen. Die Stellung der Seitenflächen wurden aus den Winkeln der Dreieckseiten und der Blattorientierung bestimmt. Die Tagesgänge wurden im übrigen mit den für die spektralen Verteilungen getroffenen Annahmen berechnet. Für die nach aussen gedrehten Blattunterseiten der jungen Aloe wurde keine Horizonteinengung angenommen und der Reflexionsdatensatz ALLSOIL verwendet. In der Abbildung III.26 sind die Tagesgänge der Bestrahlungsstärken auf

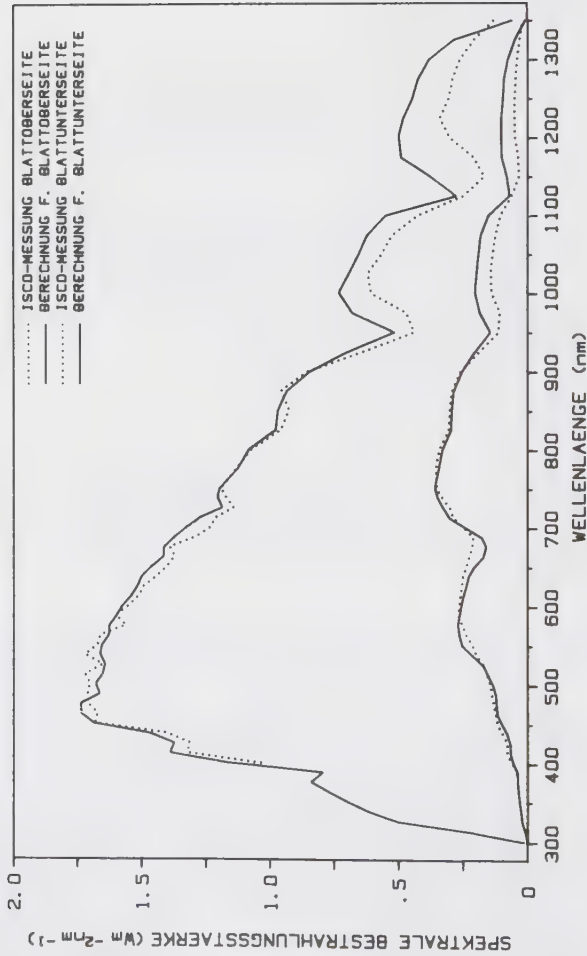


Abb. III.24: Gemessene und berechnete spektrale Verteilungen der Globalstrahlung auf die Blattober- und Blattunterseite einer älteren Aloe dichotoma

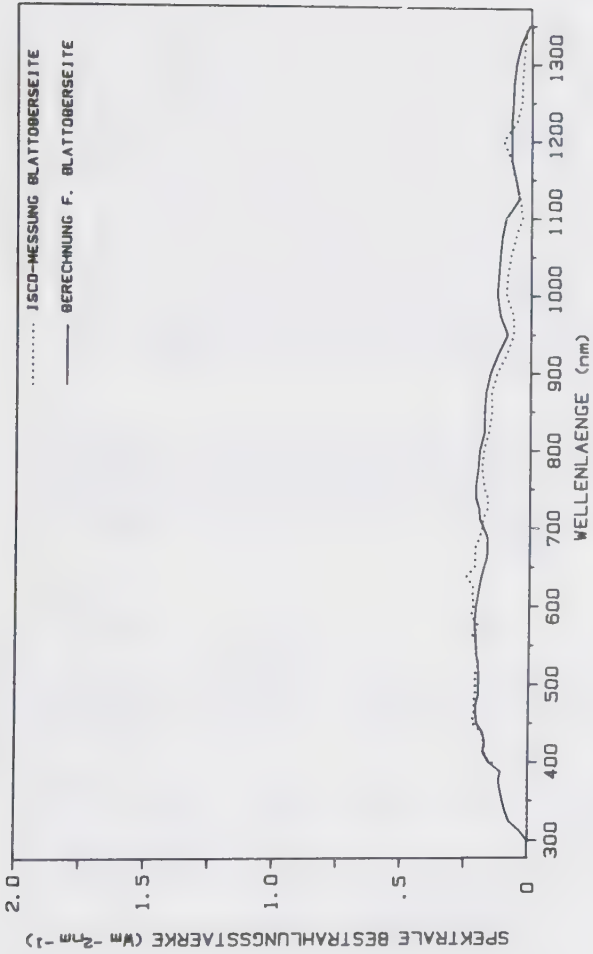


Abb. III.25: Gemessene und berechnete spektrale Verteilung der Globalstrahlung auf die senkrecht stehende, der Blattrosette zugekehrte Blattoberseite einer jungen Aloe dichotoma

die drei Seiten der jungen und der älteren Aloe dichotoma dargestellt. In Abbildung III.27 werden die mittleren, entsprechend den Flächenanteilen der drei Seiten gewichteten Bestrahlungsstärken der beiden Blätter im Tagesgang gezeigt. Es ergeben sich für die beiden Blattstellungen deutliche Unterschiede, der Tagesgang des jungen Blattes ist ausgeglichener und erreicht im Maximum höchstens halb so grosse Werte wie das ältere Blatt. In Tabelle III.5 ist der Strahlungsgenuss der absorbierten Globalstrahlung über den ganzen Tag für die beiden Blätter aufgeführt sowie das Verhältnis des jungen zum älteren Blatt. Das junge Blatt absorbiert nur etwa zwei Drittel der Strahlung des älteren Blattes, wobei aus der Aufteilung für die beiden Wellenlängenbereiche UV/VIS und IR noch zu entnehmen ist, dass die Strahlungsbelastung des jungen Blattes im Infraroten mit 58% noch stärker reduziert ist als im UV/VIS-Bereich.

Tabelle III.5: Strahlungsgenuss der absorbierten Globalstrahlung und der absorbierten Quanten pro Flächeneinheit der jungen und älteren Blätter von Aloe dichotoma für den 21. Dezember, Springbock, Republik Südafrika

	UV/VIS (MJ m ⁻²)	IR (MJ m ⁻²)	ganzes Spektrum (MJ m ⁻²)	Quanten (10 ⁷ mol m ⁻²)
junge Blätter	4.82	3.04	7.86	1.79
ältere Blätter	7.33	5.26	12.59	2.69
Verhältnis jung/alt (%)	66	58	62	67

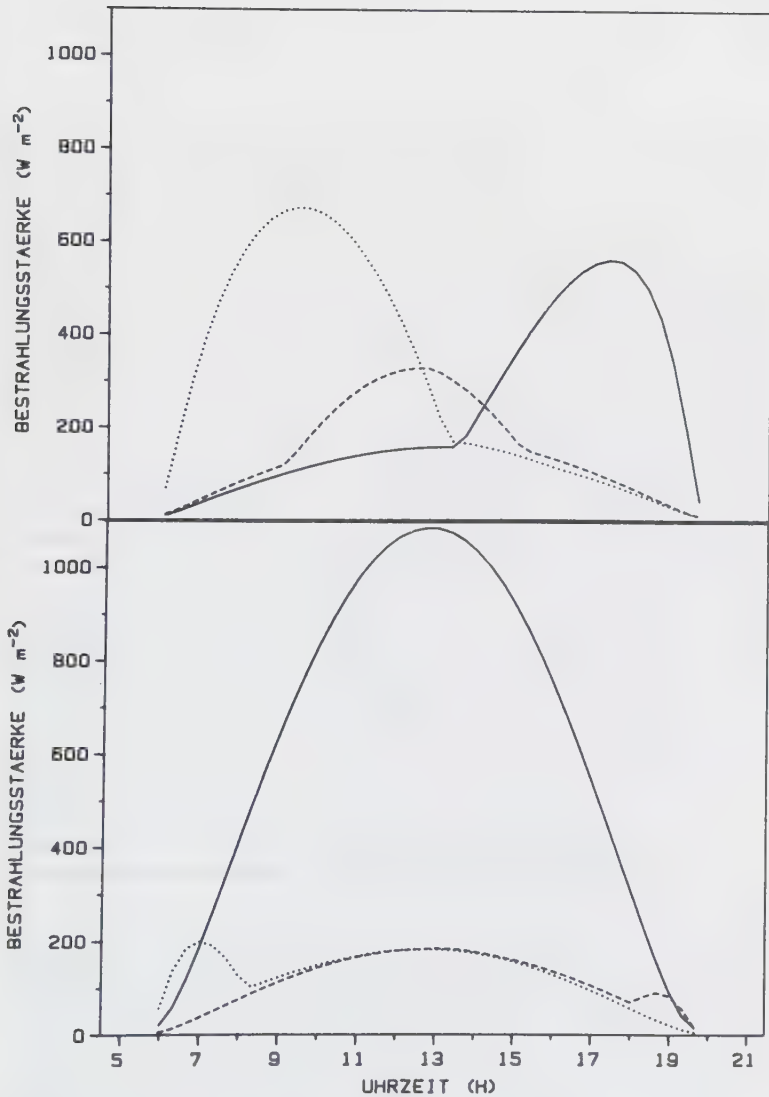


Abb. III.26: Tagesgang der Bestrahlungsstärken auf die durch drei Flächen approximierten Blätter der jungen (oberer Teil der Abb.) und der älteren (unterer Teil) *Aloe dichotoma*.

Oberseiten: —, die beiden Flächen für die Unterseiten: und ----

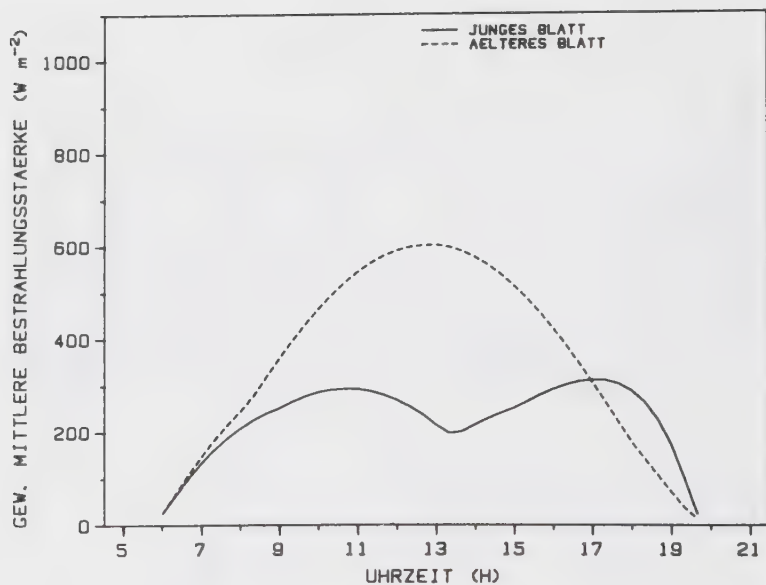


Abb. III.27: Tagesgänge der mittleren, entsprechend den Flächenanteilen der drei Seiten gewichteten Bestrahlungsstärken für ein junges und ein älteres Blatt von *Aloe dichotoma*

III.5. Diskussion

Die in Kapitel III.4. durchgeführten Vergleiche zeigen, dass das Rechenprogramm SOL die in Kapitel III.1. formulierten Anforderungen zur Berechnung der Globalstrahlung bestens erfüllt. Dies gilt insbesondere, wenn der Einfallswinkel der direkten Sonnenstrahlung zur Empfängerfläche nicht grösser als etwa 75° ist. Mit grösserem Winkel wächst der Anteil der diffusen Strahlung rasch und damit auch die Unsicherheit der berechneten Werte. Der Fehler, der für einzelne, für eine bestimmte Situation berechnete Werte gemacht wird, ist etwas schwierig abzuschätzen. Er hängt stark von den speziellen Witterungsverhältnissen und dem Anteil der diffusen Strahlung an der gesamten Globalstrahlung ab. Wird das Rechenprogramm für solche Verhältnisse gebraucht, für die es konzipiert wurde, - klarer Himmel und nicht zu starke Trübung -, so wird der zu erwartende Fehler in der Grössenordnung von etwa 7% sein, d.h. in der Grössenordnung von mobil im Felde einsetzbaren Spektroradiometern (Tabelle III.3). Dabei ist aber noch nicht berücksichtigt, dass die Fehler der Spektroradiometer erheblich grösser sein können, falls die letzte Kalibrierung längere Zeit zurückliegt. Bei Berechnungen und Vergleichen für geneigte Flächen führt die Unsicherheit, die bei der Bestimmung des Neigungswinkels und des Azimuts vorhanden ist, zu einer Vergrösserung des Fehlers. Sind diese Winkelfehler von ähnlicher Grössenordnung wie die in Abschnitt III.4.3. besprochenen, erhöht sich der Gesamtfehler auf 7 - 12%.

Bei bestimmten Untersuchungen, wie das z.B. im folgenden Teil IV. der Fall ist oder bei Energiebilanzrechnungen, ist es notwendig die Bestrahlungsstärken auf verschieden orientierte Empfängerflächen für einen ganz bestimmten Tag mit speziellen Trübungsverhältnissen zu berechnen. Um den Bezug zu anderen gewonnenen Messwerten herstellen zu können, muss deshalb eine Information über die herrschenden Trübungsverhältnisse vorhanden sein. Um diese zu erhalten, wird empfohlen, die auf eine horizontal exponierte Empfängerfläche auftreffende Globalstrahlung zu messen, z.B. mit einem Solarimeter, und die dafür berechneten Werte durch Variation der Sichtweite an die gemessenen Werte anzupassen, wie das bei Messungen, die in den Abschnitten III.4.2., III.4.3. und III.4.5. besprochen wurden,

geschehen ist. Bei horizontaler Exposition wird der Einfluss der an der Umgebung reflektierten Strahlung, deren Eigenschaften im allgemeinen am wenigsten genau bekannt sind, bei der Vergleichsmessung möglichst gering gehalten. Herrschen bei einer Untersuchung sehr spezielle klimatische Bedingungen z.B. sehr trocken und heiss, wie das bei der Messung in der Welwitschiavlake (Abschnitt III.4.2.) und bei Springbock (Abschnitt III.4.5.) der Fall war, ist es auch wünschenswert die Lufttemperatur und den Feuchtegehalt der Luft zu bestimmen und diese Werte im verwendeten Atmosphärenmodell zu berücksichtigen.

Sollen Empfängerflächen untersucht werden, deren Umgebung sich durch die spezielle Stellung stark unterscheidet, wie das z.B. bei den verschiedenen Blattstellungen von Aloe der Fall ist (Abschnitt III.4.5.), so erweisen sich Messungen der spektralen Verteilungen, wie das dort gemacht wurde, als vorteilhaft. Es kann so entschieden werden, welcher Art die reflektierte Strahlung zur Hauptsache ist. Im Falle der älteren Aloe handelte es sich im wesentlichen um Reflexionen an den eigenen Blättern, bei der jüngeren waren die Anteile gemischt, es ist dort, - auch bedingt durch die geringere Bestrahlungsstärke -, schwieriger eine Aussage über die tatsächliche an der Reflexion beteiligte Umgebung zu machen.

IV. STRALUNGSGENUSS UND PHOTOSYNTHESE NICHT-EBENER BLÄTTER

IV.1. Problemstellung

Im sonnenbeschienen Teil von Baumkronen können im Gegensatz zu den ebenen Blattspreiten in der Schattenkrone Blätter mit meist nach oben konkav gekrümmten Blattspreiten beobachtet werden. Zum Beispiel tritt dies bei Feige (*Ficus carica* L.), Flieder (*Syringa vulgaris* L.), Rosskastanie (*Aesculus hippocastanum* L.), Edelkastanie (*Castanea sativa* Mill.), Apfel (*Malus silvestris* Mill.), Birne (*Pyrus communis* L.) u.a., aber auch bei krautigen oder verholzenden Pflanzen wie Aubergine (*Solanum melongena* L.), Kartoffel (*Solanum tuberosum* L.), Salbei (*Salvia officinalis* L.), Efeu (*Hedera helix* L.) u.a. auf. Dieses Phänomen wird auch von McMillen und McClendon (1979) bei Maulbeere (*Morus rubra* L.) und Wilder Pflaume (*Prunus americana* Marsh.) beschrieben.

Es ist offensichtlich, dass durch die Krümmung der Blattspreite der Strahlungsgenuss des Blattes im Tagesgang im Vergleich zu einem ebenen Blatt verändert wird. Zur Lösung der Frage, in welcher Hinsicht diese Veränderung geschieht und welche Folgen sich daraus für das Blatt ergeben, kann das in Teil III. beschriebene Rechenprogramm SOL herangezogen werden. Durch den veränderten Strahlungsgenuss werden, wie das in Teil II. dargestellt wurde, im wesentlichen zwei Zustandsgrößen des Blattes beeinflusst, die Photosynthese und der Wärmehaushalt (Ross 1975). Die im folgenden dargestellten Untersuchungen wurden in erster Linie auf die Erfassung der Auswirkungen auf die Photosynthese konzipiert.

Wie bereits in Teil II erwähnt, ist für die Photosyntheserate die Bestrahlungsstärke auf die Blattfläche massgebend. Insbesondere bei C_3 -Pflanzen mit dem typischerweise zur Abszisse konkaven Verlauf der Abhängigkeit der Photosyntheserate von der Bestrahlungsstärke, der sog. Sättigungskurve, ist für die Berechnung der Photosyntheserate die Kenntnis der Bestrahlungsstärke auf verschieden orientierte Blattflächenelemente wesentlich. An Stelle der einfallenden Strahlung ausgedrückt als Bestrahlungsstärke, können auch die absorbierten Quanten als Bezugsgrösse verwendet werden

(Abbildungen IV.15 - IV.18). Unter der Annahme einer mittleren Bestrahlungsstärke wird bei gekrümmten Blättern für die Photosyntheserate meistens ein zu hoher Wert berechnet (Saeki 1959). Eine Ausnahme bildet der Fall, wenn sich alle Blattflächen in Bezug auf die Bestrahlungsstärke im linearen Teil der Sättigungskurve befinden und das bedeutet normalerweise, dass sie nicht der direkten Sonnenstrahlung ausgesetzt sind. Um bei einem nicht-ebenen Blatt die Beziehung Bestrahlungsstärke - Photosyntheserate im Vergleich mit einem ebenen untersuchen zu können, müssen einerseits die Bestrahlungsstärken auf die durch Ebenen approximierten Teilflächen der Blattspreite bekannt sein und andererseits die Sättigungskurve am eben ausgelegten Blatt bestimmt werden.

Duncan et al. (1967) bemerken bei der Berechnung der Photosynthese für Pflanzenbestände, dass je nach Lage im Bestand und der damit verbundenen Umweltbedingungen wie Bestrahlungsstärke, Temperatur, Feuchte und CO_2 -Konzentration die Blätter unterschiedlichen Sättigungskurven folgen und dies bei der Berechnung berücksichtigt werden sollte. Derartige Auswirkungen könnten im Prinzip auch bei einem nicht-ebenen Blatt vorhanden sein, d.h. es ist nicht unbedingt von vorneherein gegeben, dass das Blatt über die ganze Blattspreite dasselbe Photosyntheseverhalten aufweist. Als erstes soll deshalb versucht werden, aus der Sättigungskurve und den berechneten Bestrahlungsstärken den Verlauf der Photosyntheserate im Tagesgang zu simulieren und zu überprüfen, ob diese mit der gemessenen übereinstimmt.

Es ist anzunehmen, dass ein ebenes Blatt im Maximum grösseren Bestrahlungsstärken im Laufe des Tages ausgesetzt ist, als ein Blatt gleicher mittlerer Neigung und Orientierung mit gekrümmter Blattspreite. Die Krümmung bewirkt, dass zum gleichen Zeitpunkt auf einzelnen Teilflächen der Blattspreite sehr unterschiedliche Bestrahlungsstärken auftreten, was durch eine mögliche Selbstbeschattung noch verstärkt werden kann. Die im Tagesverlauf maximal auftretende Bestrahlungsstärke ist deshalb ein für das ganze Blatt gewichtetes Mittel (Summe aus den mit den Teilflächen multiplizierten Bestrahlungsstärken der einzelnen Teilflächen). Die Auswirkung der durch die Blattkrümmung auf diese Weise reduzierten Bestrahlungsstärke auf die Photosyntheserate wird

durch die konkave Krümmung der Sättigungskurve noch zusätzlich verstärkt. Bei diesen Ueberlegungen ist jedoch in Betracht zu ziehen, dass ein Maximum an Strahlungsgenuss für ein Blatt nicht unbedingt ein Optimum für seine physiologische Leistungsfähigkeit und hier insbesondere für seine Photosynthese darstellt. Für C_3 -Pflanzen, die einen Sättigungswert aufweisen, der unter den Maximalwerten der natürlichen Bestrahlungsverhältnissen liegt, ist es uninteressant sich Bestrahlungsstärken auszusetzen, die über diesem Sättigungswert liegen. Zu hohe Bestrahlungsstärken bedeuten für das Blatt eine schlechtere Ausnützung der absorbierten Strahlung, was sich als Wärmebelastung bemerkbar macht. Dies wirkt sich vor allem unter sommerlich warmen Bedingungen aus, wo bereits die Lufttemperatur das Temperaturoptimum der Photosynthese überschreiten kann. McMillen und McClendon (1979) weisen auf dieses Problem hin. Sie schätzten die Verhältnisse anhand von zwei Modellbetrachtungen für die Situation eines ganzen Baumes ab und erwähnten, dass die Blattkrümmungen und die steilere Stellung der Sonnenkronenblätter zu einer geringeren Wärmebelastung bei gleicher Photosyntheseleistung der einzelnen Blätter führen kann.

Im folgenden soll untersucht werden, wie diese Verhältnisse an konkreten Beispielen für einzelne, gekrümmte Blätter aussehen, d.h. wie der Verlauf der Bestrahlungsstärken während des Tages verglichen mit dem Sättigungswert ist und dies im Vergleich mit einem ebenen Blatt derselben Mittelrippenneigung und -orientierung.

IV.2. Material und Methoden

IV.2.1. Versuchspflanzen: Auswahlkriterien und Anzucht

Die Auswahl der Versuchspflanzen richtete sich nach folgenden Kriterien:

- deutlich gekrümmte Blätter, die sich eben auslegen lassen
- Verwendbarkeit in der Gaswechselküvette und -messanlage, d.h. Blattgrösse und Stiel sowie eine Photosyntheserate von entsprechender Grösse
- gut kultivierbar in Töpfen von ca. 20 cm Durchmesser
- Sonnenpflanzen
- C₃-Pflanzen mit dem in Abschnitt IV.1. erwähnten Verlauf der Sättigungskurve.

Zwei Pflanzenarten erwiesen sich als besonders geeignet, einerseits die Aubergine, *Solanum melongena* L. und andererseits die Feige, *Ficus carica* L.

Aubergine wurde aus handelsüblichen Samen gezogen (Blue King F-1 Hybride). Die Aussaat erfolgte Anfang April im Gewächshaus bei etwa 24°C. Zwei bis drei Wochen nach der Keimung wurden die Pflanzen in einzelne Töpfe verpflanzt und bei 18 - 20°C im Gewächshaus kultiviert.

Zur Anzucht der Feigenpflanzen wurden Stecklinge im Juni des Vorjahres von einem Altbaum geschnitten und im Gewächshaus bei 25°C bewurzelt. Nachdem sie gut angewachsen waren, verbrachten sie den Rest der Vegetationsperiode bis Ende Oktober auf der Dachterrasse des Institutes in der Nähe des Standortes der Gaswechselanlage. Den Winter über wurden sie im Kalthaus bei 16 - 18°C gehalten.

Ende Mai, eineinhalb Monate vor Beginn der Gaswechselmessungen, wurden beide Pflanzenarten zur Anpassung an das Lichtangebot und das Klima ins Freie an den Standort der Gaswechselanlage gebracht. Die nun auf der Dachterrasse neu gebildeten Blätter zeigten, im Gegensatz zu den im Gewächshaus gebildeten, praktisch ebenen Blättern, die gewünschte Krümmung der Blattfläche. Bei

der Verwendung für die Messungen waren die Pflanzen etwa 40 - 60 cm hoch.

IV.2.2. Bestimmung der Bestrahlungsstärke und des Strahlungs- genusses

IV.2.2.1. Messung der einfallenden Strahlung

Um das Strahlungsangebot entsprechend den Ausführungen in Kapitel III.5. berechnen zu können, wurde die Globalstrahlung parallel zu den Gaswechsellmessungen mit einem horizontal exponierten Solarimeter (CM-5, Kipp+Zonen, Delft, NL) neben der Gaswechselküvette gemessen (s. Abb. IV.1). Auf dem gleichen Stativ neben dem Solarimeter war ein Quantenfühler (LI-190 S, LICOR inc., Lincoln, USA) zur Registrierung der einfallenden Quanten im Bereich 400 - 700 nm, ebenfalls in horizontaler Lage, montiert. Da die Quantenfühlerwerte mit einer weitaus grösseren Messfehler behaftet sind, $\pm 5\%$ im Gegensatz zu $\pm 1\%$ beim Solarimeter -, geschah die Anpassung der Strahlungsberechnungen an die temperaturkorrigierten Solarimeterwerte.

IV.2.2.2. Die nachführbare Gaswechselküvette

Für die Gaswechsellmessung wurde anflanschbar an das Klimaaggregat der Gaswechselkammer GK 2.5/16-16 (Walz, Eiffeltrich, BRD) eine spezielle, um zwei Achsen drehbare Küvette konstruiert, die in Abbildung IV.2 gezeigt ist. Damit wird erreicht, dass die vordere Seitenwand (A) der Sonne nachgeführt werden kann, und somit für den Strahlengang der direkten Sonnenstrahlung, die den Hauptteil der gesamten Bestrahlungsstärke ausmacht, praktisch immer die gleichen Transmissionsbedingungen herrschen. Die von Eller und Koch (1977) untersuchten Änderungen der Globalstrahlung innerhalb der Gaswechselküvetten durch unterschiedliche Einfallswinkel der direkten Sonnenstrahlung, konnten so weitgehend konstant gehalten und mit den in Abschnitt IV.2.2.3. dargestellten Transmissionseigenschaften berechnet werden.

Entsprechend der aktuellen Kulminationshöhe der Sonne lässt sich die Küvette mittels der Achse (B) in Schritten von 5° verstellen.

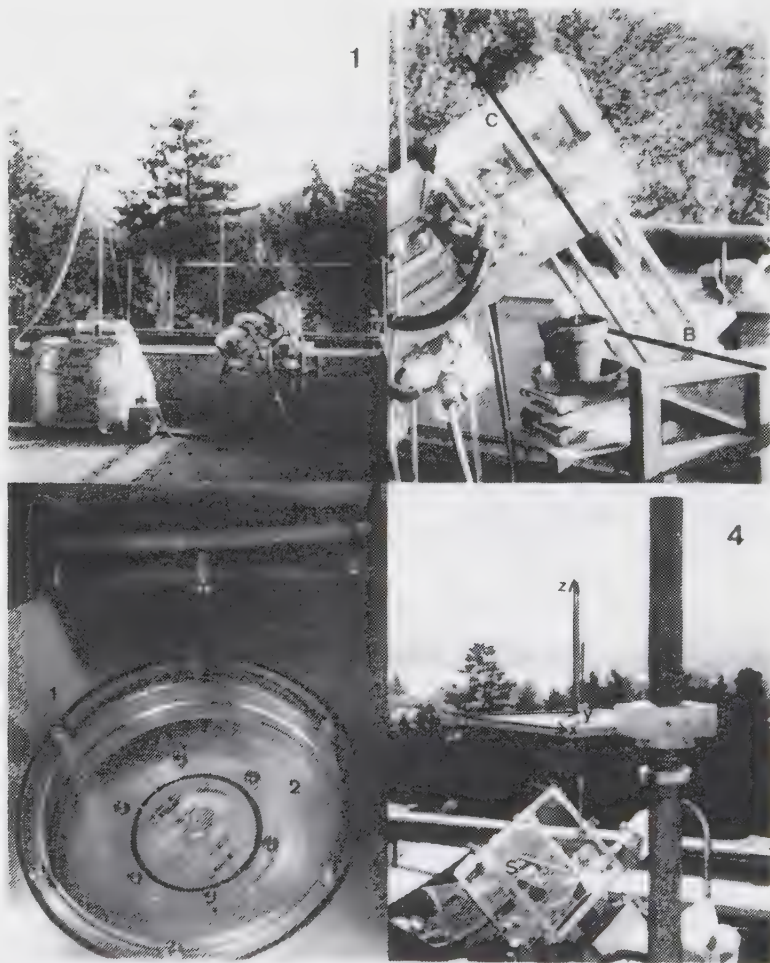


Abb. IV.1: Messanordnung auf der Dachterrasse des Institutes

Abb. IV.2: Drehbare Gaswechselküvette; A der Sonne zugewandte Seite, B Achse für Zenitdistanz der Sonne, C Azimutachse

Abb. IV.3: Küvettenboden; 1 drehbarer Teil, 2 fixer Teil

Abb. IV.4: Blattaster; x, y, z: Koordinatenachsen, S Messpunkt

Die Deklinationsänderung der Sonne wurde nicht berücksichtigt. Sie wirkt sich maximal zur Zeit der Sonnenwende und bei tiefsten Sonnenständen aus. In der Zeit, in der gemessen wurde (Ende Juli bis Ende Oktober), ergab dies eine maximale Zunahme der Schichtdicke um 1 mm bei 80° Zenitdistanz. Vergleicht man diesen Wert mit den Transmissionskurven von 10 mm und 15 mm dickem Plexiglas in Abschnitt IV.2.2.3., so erweist sich diese Vernachlässigung als zulässig.

Wie die Nachführung um die Achse C erfolgt, ohne dass das Blatt mitgedreht wird, ist aus der Photographie IV.3 des Küvettenbodens ersichtlich. Teil 1 lässt sich in fixen Winkeln von 15° um den Ring 2 drehen. Die Verbindung zwischen den beiden Teilen ist mit einem O-Ring abgedichtet und wird von vier Schrauben zusammengepresst. Bei der Drehung, die etwa stündlich erfolgte, mussten die Schrauben gelöst werden, wobei nicht verhindert werden konnte, dass in dieser Zeit etwas Luft in die Küvette drang. Nach Möglichkeit erfolgte die Drehung im Zustand "Vergleichen" der Gaswechselanlage (s. Abschnitt IV.2.3.1.). Aus dem Verlauf der Gaswechselrate ergab sich, dass davon höchstens der darauffolgende Messwert beeinflusst wurde. Diese Werte sind bei den Ergebnissen entsprechend in Klammern gesetzt. Die Zunahme der Plexiglasschichtdicke durch die Drehung um jeweils 15° betrug im Maximum 0.3 mm.

IV.2.2.3. Optische Eigenschaften der Blätter und Transmissions-eigenschaften von Plexiglas

Die Messungen der optischen Eigenschaften wurden mit einer Ulbrichtschen Kugel und zwei Spektroradiometern durchgeführt, im Bereich 380 - 1050 nm mit einem LICOR - Spektroradiometer (LI 1800, LICOR inc., Lincoln, Nebraska USA), wie in Tanner und Eller (1986) beschrieben, und im Bereich 1050 - 1500 nm mit einem Spektroradiometer SR (ISCO, Lincoln, Nebraska USA).

Für die Werte 300 - 400 nm wurde ein konstanter Verlauf angenommen (Eller 1979), der sich aus der mittleren Lage der bei 380 - 400 nm gemessenen Werte ergab. Bei 1050 nm wurde das Mittel aus den beiden gut übereinstimmenden Spektroradiometerwerten gebildet. Die Differenz der beiden Reflexions-, Transmissions-

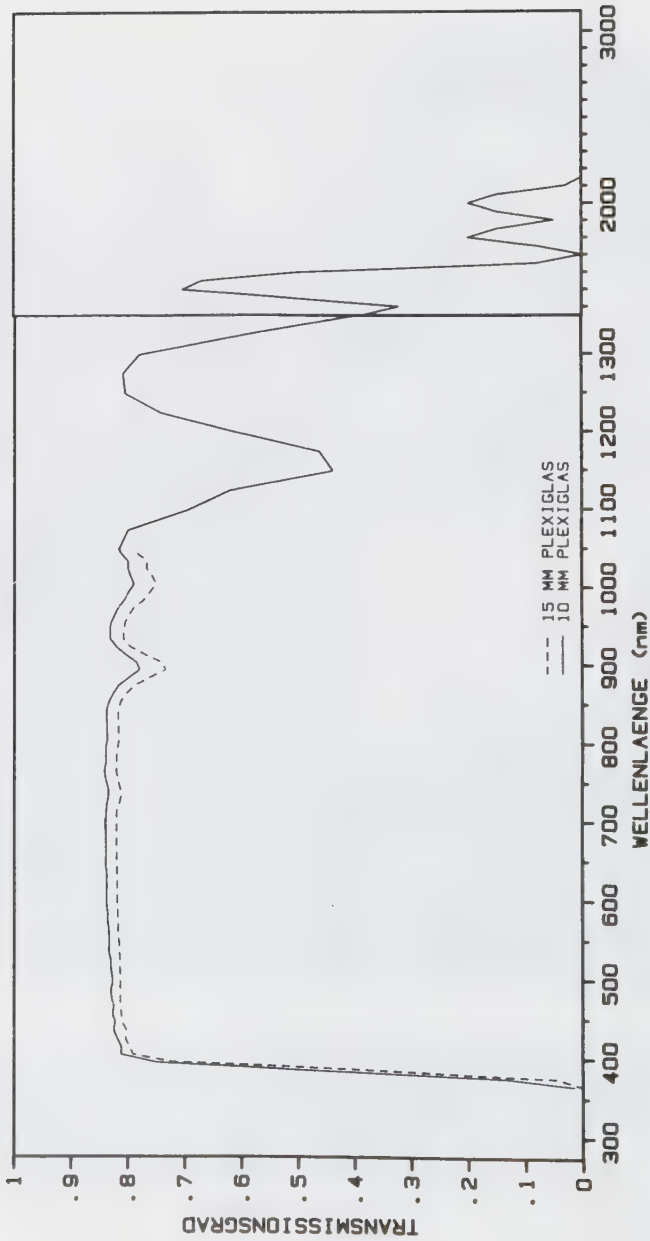


Abb. IV.5: Transmissionsgrad von Plexiglas

bzw. Absorptionswerte betrug maximal 0.01. Die Erweiterung des spektralen Bereiches auf 220 - 3000 nm und die Mittelung von Werten zur Erstellung von Datensätzen für das Rechenprogramm SOL geschah in derselben Weise wie in Abschnitt III.4.5. beschrieben.

Um die Strahlungsverhältnisse in der Küvette berechnen zu können, wurden die Transmissionseigenschaften der 10 mm dicken Plexiglaswände und des 15 mm dicken Deckels (beide: plexiglas gs DIN 4102-B2, Nr. 233) bestimmt. Die Werte von 1550 - 3000 nm wurden den technischen Unterlagen der Herstellerfirma (röhm GmbH, 1971) entnommen, die restliche Erweiterung zu einem SOL - Datensatz erfolgte wie bei den optischen Eigenschaften der Blätter. Die Transmissionskurven sind in Abbildung IV.5 dargestellt.

IV.2.2.4. Bestimmung der Blattkrümmung, der Orientierung des eben ausgelegten Blattes und der Blattfläche

Um die Berechnung der Bestrahlungsstärke des nicht-ebenen Blattes zu ermöglichen, wurde die Blattfläche in ebene Teilflächen aufgelöst. Die Lage der Ebenen durch diese Teilflächen kann aus drei Punkten in dieser Ebene berechnet werden. Zur Bestimmung der kartesischen Koordinaten der ausgewählten Punkte stand der in Abbildung IV.4 gezeigte Blattaster zur Verfügung. Er konnte über der Küvette fix montiert werden, so dass die eingezeichneten x- und y-Achsen eine horizontale Ebene aufspannten. Die auf den beiden Achsen senkrecht stehende z-Achse zeigte damit in Richtung Zenit. Die Abweichung der -x-Achse von der Südlage wurde mittels Schattenwurf eines Spaltes bei Kulmination bestimmt. Sie betrug 2° in westlicher Richtung. Wenn die Spitze (S) des Stiftes den zu messenden Punkt auf dem Blatt berührte, liessen sich die drei Koordinaten auf den an den Achsen angebrachten Massstäben ablesen.

Die Berechnung von Neigungswinkel und Azimut der Normalen zur Fläche (vergl. Abbildung IV.6) ergab sich aus den folgenden Beziehungen. Es seien $P_1 = (x_1, y_1, z_1)$, $P_2 = (x_2, y_2, z_2)$ und $P_3 = (x_3, y_3, z_3)$ die drei Punkte in der Ebene und $\vec{v}_2$ und $\vec{v}_3$ die Vektoren von P_1 nach P_2 bzw. von P_1 nach P_3 gemäss Abbildung IV.6, dann ergibt sich ein auf der Ebene senkrecht stehende

Vektor $\vec{v}_1$ aus dem Vektorprodukt von $\vec{v}_2$ und $\vec{v}_3$:

$$\vec{v}_1 = \vec{v}_2 \times \vec{v}_3 = \begin{pmatrix} x_{v1} \\ y_{v1} \\ z_{v1} \end{pmatrix} \quad (\text{IV.1})$$

$$\text{mit } \vec{v}_2 = \begin{pmatrix} x_2 - x_1 \\ y_2 - y_1 \\ z_2 - z_1 \end{pmatrix}$$

$$\text{und } \vec{v}_3 = \begin{pmatrix} x_3 - x_1 \\ y_3 - y_1 \\ z_3 - z_1 \end{pmatrix} .$$

Der Neigungswinkel berechnet sich aus dem Richtungs cosinus $\cos \gamma$ von $\vec{v}_1$ zur z-Achse:

$$\cos \gamma = \frac{z_{v1}}{|\vec{v}_1|} \quad (\text{IV.2})$$

$$\text{wobei } |\vec{v}_1| = \sqrt{x_{v1}^2 + y_{v1}^2 + z_{v1}^2} .$$

Das Azimut (0° = Süden, positiv über W-N-O gezählt) ergibt sich aus dem Winkel α , der die Projektion $\vec{p}_{v1} = (x_{v1}, y_{v1}, 0)$ von $\vec{v}_1$ auf die x-y-Ebene mit der x-Achse bildet, und der Abweichung der -x-Achse von der Südlage. Der Cosinus von α lässt sich aus

$$\cos \alpha = \frac{x_{v1}}{\sqrt{x_{v1}^2 + y_{v1}^2}} \quad (\text{IV.3})$$

berechnen. Diese Beziehungen wurden im PL1-Programm BLATT programmiert, das aus den gemessenen Punktkoordinaten die Neigungswinkel und Azimute berechnet, welche als Datensatz abgespeichert wurden.

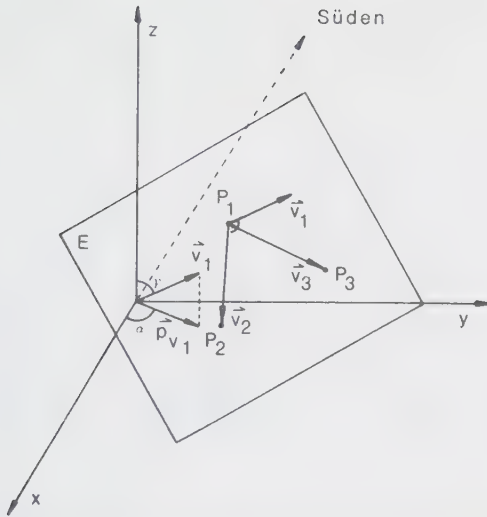


Abb. IV.6: Koordinatensystem des Blattasters mit der durch P_1 , P_2 und P_3 bestimmten Ebene E und einem auf E senkrecht stehenden Vektor $\vec{v}_1$.

Die Fehler, mit denen die auf diese Weise bestimmten Neigungswinkel und Azimute behaftet sind, wurden auf je 1° abgeschätzt. Für die mit dem Rechenprogramm SOL berechneten Bestrahlungsstärke auf die einzelnen Teilflächen ist deshalb ein zusätzlicher Fehler derselben Größenordnung wie in Abschnitt III.4.3. zu erwarten, d.h. 0 bis $\pm 5\%$ bei Einfallswinkeln, die kleiner als 75° sind.

Die Einteilung der Blattfläche in Teilflächen geschah empirisch. Es zeigte sich, dass mit 15 - 20 Teilflächen die Blattfläche gut beschrieben werden konnte. Vor der Ausmessung der Koordinaten wurde vom Blatt ein Polaroidbild gemacht, um die genaue Lage der auszumessenden Punkte einzutragen und die Grenzlinien zwischen den Teilflächen zu markieren.

Für die Bestimmung der Orientierung des eben ausgelegten Blattes wurden vier Punkte ausgemessen, zwei entlang der Mittelrippe in der Nähe des Blattgrundes und der Blattspitze, und je einen auf jeder Blatthälfte gegen den Rand der Blattspreite hin.

Als Bezugsgrösse diente die Blattfläche. Um deren Grösse zu bestimmen, wurden die Konturen der beiden eben ausgelegten Blatthälften auf ein Pauspapier kopiert und anschliessend mit dem Planimeter ausgemessen. Aus dem Polaroidbild waren die genauen Lagen der ausgemessenen Punkte und der Verlauf der Grenzlinien zwischen den Teilflächen ersichtlich und konnten mittels des unter dem Pauspapier gelegenen Blattes exakt eingezeichnet werden. Die Teilflächen wurden ebenfalls mit dem Planimeter ermittelt und deren Summen mit den Flächen der Blatthälften verglichen. Durch prozentuale Erhöhung bzw. Erniedrigung aller Teilflächen wurden sie auf denselben Wert gebracht. Die ursprüngliche Abweichung der Summen lag zwischen 0.2% und 1.8%.

IV.2.2.5. Beschattungen des Blattes und Horizonteinengung

Die möglichst exakte Erfassung der beschatteten Anteile eines Blattes ist für die Berechnung seiner Bestrahlungsstärke sehr wichtig. Der Anteil der Himmelsstrahlung an der Globalstrahlung beträgt auch bei grossen Einfallswinkeln nicht mehr als 50%. Um die Beschattungen des gebogenen Blattes, die einerseits durch die Krümmung der Blattfläche selbst und andererseits durch Objekte der Umgebung bedingt sind zu erfassen, wurde das Blatt während den Gaswechselmessungen viertelstündlich photographiert. Beim eben ausgelegten Blatt genügte eine Aufnahme pro Stunde.

Bei der Auswertung der Messungen wurde für jede Teilfläche bestimmt, von welchem Zeitpunkt an und bis wann sie ganz bzw. halb beschattet war, und dies bei der Berechnung der Bestrahlungsstärke berücksichtigt. Beim eben ausgelegten Blatt wurden die prozentualen Anteile der beschatteten Flächen an der ganzen Blattfläche durch Planimetrieren bestimmt.

Zur Abschätzung der Horizonteinengung durch die Umgebung (Gebäude, Bäume, Berge) und Küvettenteile (Klammern zur Fixierung des Deckels) wurde von der Küvette aus die Himmelshalbkugel mit

einer Fischeuglinse (Brennweite: 15 mm, Cannon) photographiert. Die verschiedenen Erhöhungen wurden mit einem Sextanten (Plath, Hamburg, BRD) bezüglich ihrer Höhe ausgemessen. Es ergab sich eine mittlere Horizonteinengung von 5° und eine zusätzliche Abdeckung von etwa 8 - 10%. Diese Grössen wurden bei der Berechnung der Himmelsstrahlung berücksichtigt.

IV.2.3. Gaswechselmessung

IV.2.3.1. Aufbau der Messanlage

Die Gaswechselmessungen geschahen nach dem Prinzip eines offenen Hauptschlusses zur Messung der CO_2 - Konzentration mit geschlossenem Nebenschluss zur Feuchteregelung. Der Aufbau, der in Abbildung IV.7 schematisch dargestellt ist, deckt sich weitgehend mit dem von Seibert (1984) beschriebenen zur Untersuchung der Abhängigkeit der Photosynthese vom Einfallswinkel. Es werden im folgenden nur diejenigen Teile eingehender dargestellt, die sich von denjenigen bei Seibert (1984) unterscheiden.

Der in der Abbildung links von der gestrichelten Linie liegende Teil der Anlage war im Freien auf der Dachterrasse des Institutes aufgebaut. Der Standort lag an der Südspitze des Gebäudes, wo der Himmel weitgehend frei von störenden Horizonteinengungen war. Die Situation zeigt Abbildung IV.1. Die Luft wurde über den links in der Abbildung zu sehenden Schlauch aus etwa drei Metern Höhe über dem Terrassenboden angesaugt. Dies diente der Vermeidung von grösseren CO_2 - Schwankungen durch Ausatemluft und Luftturbulenzen über dem Boden.

Die Temperatur und die Feuchte und damit auch das Wassersättigungsdefizit wurden in der Küvette konstant gehalten. Die Temperatur wurde mit dem zur Gaswechselkammer GK 2.5/16-6 (Walz, Effeltrich, BRD) gehörenden Regler auf 22°C eingestellt. Zur Konstanthaltung der Eingangsfeuchte wurde die angesaugte Luft im "Sprudler" (S) (Abb. IV.7) angefeuchtet und mittels Kältefalle (KF1) (KF 24/6b Walz, Effeltrich, BRD) und deren Regler auf 12.5°C Taupunkt im Sommer und 10.5°C Taupunkt im Herbst gebracht. Während der Nacht wurde die Eingangsfeuchte nicht geregelt und

der Luftstrom mit einem Magnetventil (MV) entsprechend der Abbildung so umgeleitet, dass die Luft direkt angesaugt wurde. Dies diente während der Nacht der Verhinderung von Taupunktunterschreitungen in den Schläuchen oder sonstigen Teilen der Gaswechselanlage. Zur Regelung der Feuchte im Nebenschluss durch Kondensation in der Kältefalle (KF2) dient der Eingangsfeuchtwert als Sollwert und der Ausgangsfeuchtwert als Istwert.

Um die Durchsätze im Hauptschluss, d.h. das Vergleichsgas und Messgas, auf gleichen Wert regulieren zu können, wurden in beiden Ästen Massendurchflussmesser (DFM1 und DFM2) (Brooks, Hatfield, USA) angebracht. Die Durchsätze im Hauptschluss betrugen 2.5 - 3.0 l, derjenige im Nebenschluss 11 - 13 l.

Die Messung der Differenzen der CO_2 - Konzentrationen wurde mit einem Einstrahl-Infrarot-Gasanalysator UNOR 4N (Maihak, Hamburg, BRD) im Messbereich ± 200 ppm durchgeführt. Der Messdruck wurde zur Vermeidung von CO_2 - Rückdiffusionen bei 50 mbar Ueberdruck gegenüber dem aktuellen Luftdruck gehalten. Zur Bestimmung des Nullpunktes ist das Gasumschaltgerät GKIIa extern während den Messungen oder von Hand umschaltbar von der Stellung "Messen" zur Stellung "Vergleichen". Im Zustand "Vergleichen" wird der Gasstrom des Vergleichsvolumens durch beide UNOR-Küvetten geleitet (Nullpunkt des Gasanalysators). Die Eichung des Gasanalysators erfolgte jeweils ein bis drei Tage vor den Messungen mit zwei Eichgasen von 351 und 318 ppm ± 2 % CO_2 -Gehalt (Messer Griesheim GmbH, Düsseldorf, BRD).

Die Blattemperatur wurde mit einem Cu/CuNi-Thermoelement der Drahtdicke 0.07 mm gemessen, das in die Mittelrippe auf der Blattrückseite eingestochen wurde. Damit war das Thermoelement vor Besonnung geschützt.

IV.2.3.2. Datenerfassung und Auswertung

Für die Aufnahme der Daten stand ein Datenerfassungssystem ORION A (Solartron Schlumberger, Farnborough) zur Verfügung. Dieses wurde von einem APPLE II (apple computer inc., Cupertino, USA) gesteuert, der auch die weitere Auswertung, Mittelwertbildung über zehn Minuten und die Ausgabe der Werte auf einen Thermodrucker und als Bildschirmgraphik besorgte. Die gemittelten Daten konnten in Blöcken von je sechs Stunden auf Disketten abgespeichert werden. Da das Datenerfassungssystem nur während den eigentlichen Messungen in Betrieb war, wurde zusätzlich ein Teil der Messwerte zur Ueberwachung der Anlage durch einen Analog-12-Kanal-Punktendrucker Transokomp 288 (Philips, Withof, Kassel, BRD) registriert.

Jede Minute wurden von ORION A die Messwerte von Solarimeter, Quantenfühler, Luftdruckmesser, Lufttemperaturfühler, Temperaturfühler in der Gaswechsellkuvette, Thermoelement und Referenzbadfühler, Durchflussmesser im Hauptschluss bei der Gaswechsellkuvette, Durchflussmesser im Nebenschluss, Gasanalysator und den drei Taupunktspiegeln abgefragt. Zur Bestimmung des Nullpunktes des Gasanalysators wurde zwischen der 45. und 54. Minute der jeweiligen Stunde über einen Ausgabekanal vom ORION ein Spannungssignal von 8 V an den Gasumschalter GKIIIIa gegeben zur Umschaltung vom Zustand "Messen" zu "Vergleichen". Für diese zehnminütige Zeitspanne wurde die CO₂-Konzentrationsdifferenz aus den beiden Werten der 45. und 54. Minute bestimmt. Der Nullpunkt wurde während der 49. Minute erfasst.

Die im folgenden beschriebenen Berechnungen der Nettophotosyntheserate, Transpiration und des Blattleitwertes wurden vom APPLE für das ganze Blatt berechnet, da die Blattfläche, die als Bezugsgrösse diente, erst nach den Messungen bestimmt werden konnte. Die Werte mussten also nachträglich noch durch diese Grösse dividiert werden. In der nachfolgenden Darstellung ist diese Division bereits berücksichtigt.

Die Nettophotosyntheserate in ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) wird nach der Gleichung

$$F_N = \frac{\Delta \text{ppm}}{V_{\text{CO}_2}} \cdot 10^{-6} \cdot \frac{p_E}{p_U} \cdot D_{BS} \cdot \frac{1}{BF} \quad (\text{IV.4})$$

mit $\Delta \text{ppm} = \text{Messwert}_{\text{UNOR}} \text{ (mV)} \cdot e \text{ (ppm/mV)}$

$e \text{ (ppm/mV)} = \text{Eichfaktor für UNOR}$

$p_E \text{ (mbar)} = \text{Eichdruck}$

$V_{\text{CO}_2} \text{ (dm}^3\text{/mol)} = \text{Molvolumen von CO}_2$

$= 22.261 \text{ dm}^3\text{/mol}$

$p_U \text{ (mbar)} = \text{Luftdruck} + 50 \text{ mbar Ueberdruck}$

$D_{BS} \text{ (dm}^3\text{/s)} = \text{Durchfluss im Hauptschluss}$

$BF \text{ (m}^2\text{)} = \text{Blattfläche}$

berechnet.

Für die Berechnung der Transpiration musste zunächst die absolute Feuchte aus den Messwerten der Taupunktspiegel bestimmt werden. Aus den Taupunkttemperaturen $T_{\text{TAUP.}}$ lässt sich nach der von List (1971) angegebenen Näherungsformel der Sättigungspartialdruck p_{ws} von Wasserdampf über Wasser und damit der aktuelle Wasserdampfpartialdruck p_w in (mbar) berechnen:

$$p_w = p_{\text{ws}}(T_{\text{TAUP.}}, p_o) \cdot p_L / p_o \quad (\text{IV.5})$$

wobei $p_L \text{ (mbar)} = \text{Luftdruck}$

$p_o \text{ (mbar)} = \text{Normaldruck} = 1013.25 \text{ mbar.}$

Der absolute Wasserdampfgehalt H_T in (g/m³) ergibt sich aus der Gleichung

$$H_T = M_{\text{H}_2\text{O}} \cdot p_w / (R \cdot T) = 216.68 \cdot p_w / T \quad (\text{IV.6})$$

mit $M_{\text{H}_2\text{O}} = \text{Molmasse von Wasser} = 18.0153 \text{ g/mol}$

$R = \text{molare Gaskonstante} = 8.31441 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$

$T \text{ (K)} = \text{Temperatur.}$

Die Differenzen der Ausgangsfeuchte H_{AF} und Nebenschlussfeuchte H_{NF} und, wenn Istwert und Sollwert der Regelung nicht übereinstimmen, der Ausgangsfeuchte und Eingangsfeuchte H_{EF} sind zusammen mit den entsprechenden Durchflussraten für Nebenschluss

D_{NS} und Hauptschluss D_{HS} in (dm^3/s) ein Mass für die Transpiration B. Ausgedrückt in ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) ergibt dies:

$$B = ((H_{AF} - H_{NF}) \cdot D_{NS} \cdot 10^{-3} + (H_{AF} - H_{EF}) \cdot D_{HS} \cdot 10^{-3}) / (M_{H_2O} \cdot BF) \quad (\text{IV.7})$$

Das Wassersättigungsdefizit VPD_{GWK} (in (mbar)) in der Gaswechselkuvette (GWK), das bei exakter Regelung bei diesen Messungen konstant bleibt, berechnet sich mit der Gleichung

$$VPD_{GWK} = p_{WS}(T_{GWK}) - p_{WS}(T_{AF}) \quad (\text{IV.8})$$

Um das Wassersättigungsdefizit zwischen Luft und Blatt VPD_{BL} zu bestimmen, wird angenommen, dass der substomatäre Raum eine wasserdampfgesättigte Atmosphäre habe. Es ergibt sich:

$$VPD_{BL} = p_{WS}(T_B) - p_{WS}(T_{AF}) \quad (\text{IV.9})$$

wobei T_B = Blattemperatur.

Der Blattleitwert κ zur Beschreibung der Diffusionsrate von Wasserdampf durch die Stomata wird berechnet aus

$$\kappa = \frac{B}{VPD_{BL}} \cdot p_L \quad (\text{IV.10})$$

Durch den Bezug des Wassersättigungsdefizits auf 1 bar erhält . die Einheit ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$).

IV.2.3.3. Messung und mathematische Beschreibung der Sättigungskurve

Um die Abhängigkeit der Photosyntheserate (es ist im folgenden immer die NETTO-Photosyntheserate gemeint) von der Bestrahlungsstärke, auch als absorbierte Quanten in ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) im Wellenlängenbereich 400 - 700 nm ausgedrückt, zu ermitteln, wurde das Blatt mittels eines mit Nylonfäden bespannten Blatthalters eben ausgelegt. Es wurde darauf geachtet, dass die Lage des Blattes einigermassen der ursprünglichen

Stellung und Orientierung der Mittelrippe entsprach, damit die Strahlungsverhältnisse im Tagesgang nicht zu stark änderten. Der Einfluss der 0.15 mm dicken Nylonfäden auf den Strahlungsgegnuss kann vernachlässigt werden.

Zur mathematischen Beschreibung der Sättigungskurve wurde die in der Literatur (Gaastra, 1959, Monteith 1965, Duncan et al. 1967 u.a.) vielfach verwendete rechtwinklige Hyperbel entsprechend der Gleichung

$$P_N = \frac{b \cdot I}{1 + a \cdot I} - r \quad (\text{IV.11})$$

mit I = Bestrahlungstärke

a , b Kurvenparameter

r = Respirationsrate

benützt. Es zeigte sich, dass der Verlauf der gemessenen Kurven, der bei diesen Untersuchungen wesentlich war, durch diese Gleichung gut wiedergegeben werden konnte, obwohl die Abhängigkeit von der Bestrahlungsstärke damit vereinfacht dargestellt wird (Gates 1980).

Aus dem Verlauf der gemessenen Kurve lassen sich der Schnittpunkt mit der x-Achse K_p , der dem Kompensationspunkt entspricht, die Anfangssteigung A_s und der asymptotische Wert auf der y-Achse P_m , der der theoretisch maximalen Photosyntheserate entspricht, ungefähr abschätzen. Die Parameter a , b und r hängen mit diesen Grössen folgendermassen zusammen:

$$a = A_s / (P_m - A_s \cdot K_p), \quad (\text{IV.12})$$

$$r = K_p \cdot P_m \cdot a, \quad (\text{IV.13})$$

$$b = P_m \cdot a + r \cdot a. \quad (\text{IV.14})$$

Durch Variieren von K_p , A_s und P_m konnte jeweils eine gute Übereinstimmung mit den gemessenen Daten erzielt werden. Es wurde dabei jedoch nicht darauf geachtet, dass die Respirationsrate r und der Kompensationspunkt K_p den tatsächlichen Verhältnissen entsprachen, da dieser Teil der Sättigungskurve für diese Untersuchungen unwesentlich war.

IV.2.3.4. Zur Durchführung der Messungen

Einige Tage vor Messbeginn wurde eine Pflanze mit einem geeignet exponierten, ausgewachsenen Blatt ausgesucht und das Blatt zur Anklimateisierung in seiner natürlichen Stellung und Orientierung in die Küvette eingebracht. Sobald die Wetterlage einen Tag mit sehr klaren Witterungsverhältnissen versprach, wurde die Gaswechselmessung am gebogenen Blatt durchgeführt. Sofort anschliessend geschah die Blatteinteilung in Teilflächen, das Ausmessen der Blattfläche mit dem Blattaster und das ebene Auslegen der Blattspreite mit Hilfe des Blatthalters. Die Sättigungskurve wurde so rasch als möglich, d.h. sobald wieder klare Bedingungen herrschten, spätestens aber nach einer Woche, bestimmt. Es sollte so nach Möglichkeit verhindert werden, dass sich das Blatt auf einen neuen Sättigungsverlauf bedingt durch die veränderten Lichtverhältnisse einstellen konnte.

Die Bedingung der klaren Witterungsverhältnisse war notwendig, um mit dem Programm SOL repräsentative Berechnungen der Bestrahlungsstärken durchführen zu können. Diese Forderung erschwerte jedoch die Durchführbarkeit der Messungen erheblich, da in Zürich klare Tage eher selten sind. So ergab es sich, dass bis zum Ende der Vegetationsperiode nur je eine vollständige Messung an Feige und Aubergine vorlagen.

IV.3. Ergebnisse

IV.3.1. Blatteinteilungen in Teilflächen und optische Eigenschaften der Blätter

Das Auberginen- und das Feigenblatt an denen die Messungen durchgeführt wurden, sind in den Abbildungen IV.8 und IV.9 zu sehen. Die Messungen am Auberginenblatt wurden am 20. und 25. Oktober 1984 durchgeführt, diejenigen am Feigenblatt am 29./30. und 31. Juli 1984.

Die Flächeneinteilungen der beiden Blätter geschah entsprechend der Darstellungen IV.10 und IV.11. Für das Auberginenblatt ergaben sich 19, für das Feigenblatt 15 Teilflächen. Die Neigungswinkel, Azimute und Flächen der Teilflächen sind in den Tabellen IV.1 und IV.2 zusammen mit dem mittleren Neigungswinkel und Azimut der Mittelrippe und des eben ausgelegten Blattes aufgeführt. Eine gewisse Kontrolle, ob die Flächeneinteilungen repräsentativ und die berechneten Neigungswinkel und Azimute korrekt waren, ergab sich aus dem beobachteten und berechneten Zeitpunkt, bei dem die Sonnenstrahlung parallel zu der entsprechenden Teilfläche einfällt. Aus den Photographien zum Beschattungverlauf konnte der ungefähre Zeitpunkt, bei dem der Wechsel von der Besonnung der Oberseite zur Besonnung der Unterseite oder umgekehrt stattfand, entnommen und mit der entsprechenden Berechnung verglichen werden.

Die Absorptionseigenschaften der Blattober- und Blattunterseiten zeigen die Abbildungen IV.12 und IV.13. Eine Änderung dieser Eigenschaften mit dem Einfallswinkel der einfallenden Strahlung wurde dabei nicht berücksichtigt. Wie aus den Untersuchungen von Tageeva und Brandt (1961) hervorgeht, kann der Absorptionsgrad für "weisses" Licht bis zu einem Einfallswinkel von $60^\circ - 70^\circ$ als konstant angenommen werden. Für den grössten Teil des Tages sind die Einfallswinkel auf die Teilflächen kleiner. Der Anteil der Photosyntheserate der Einzelflächen an derjenigen des gesamten Blattes wächst zudem rasch mit kleiner werdendem Einfallswinkel.

Bei der Berechnung der reflektierten Strahlungsanteile wurden für die Blattoberseite die Reflexionseigenschaften des betreffenden

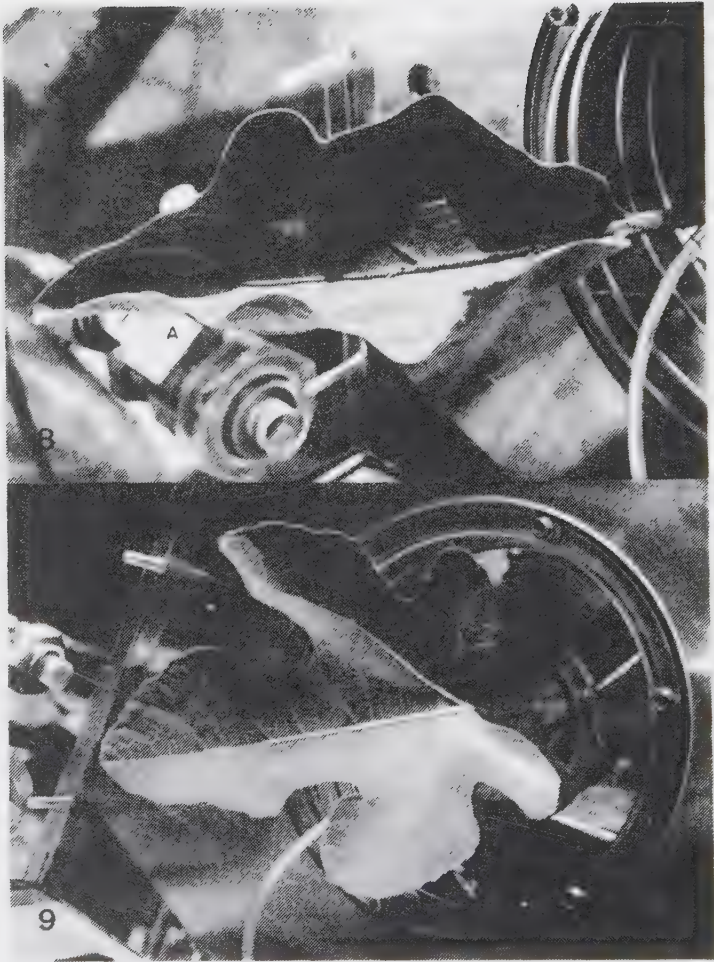


Abb. IV.8 und IV.9: Aubergineblatt A und Feigenblatt F, an denen die Messungen durchgeführt wurden

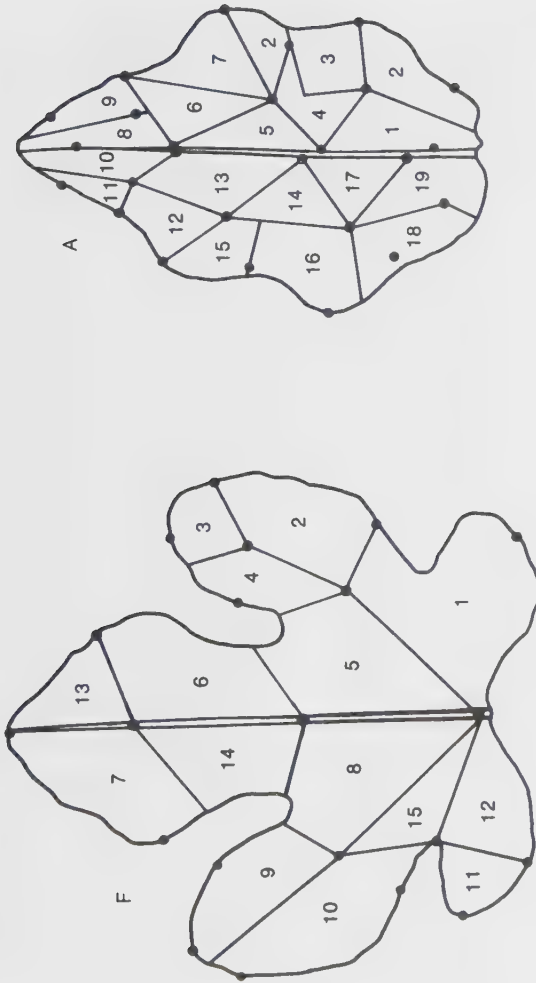


Abb. IV.11: Flächeneinteilung des Feigenblattes

Abb. IV.10: Flächeneinteilung des Aubergineblattes

Tabelle IV.1: Neigungswinkel, Azimute und Flächen der Teilflächen, Neigungswinkel und Azimut der Mittelrippe (MR) und Neigungswinkel und Azimut des eben ausgelegten Blattes (EB) der Aubergine; totale Blattfläche: 63.10 cm²

Fläche	Neig.winkel (°)	Azimut (°)	Fläche (cm ²)
1	32.0	95.6	4.67
2	38.6	142.6	5.90
3	53.5	100.3	3.08
4	35.7	95.3	2.52
5	35.5	97.7	2.69
6	65.1	113.3	3.16
7	55.2	94.9	3.87
8	52.0	107.1	2.59
9	77.3	124.0	2.09
10	56.0	349.1	2.54
11	114.1	320.9	1.25
12	96.6	333.8	2.67
13	52.7	353.7	4.49
14	49.3	2.7	3.01
15	92.1	343.9	2.62
16	76.0	356.1	5.23
17	39.0	0.3	2.77
18	89.2	305.6	4.32
19	39.8	347.4	3.63
MR	29.5	54.0	--
EB	31.0	79.0	--

Tabelle IV.2: Neigungswinkel, Azimute und Flächen der Teilflächen, Neigungswinkel und Azimut der Mittelrippe (MR) und Neigungswinkel und Azimut des eben ausgelegten Blattes (EB) der Feige; totale Blattfläche: 109.38 cm²

Fläche	Neig.winkel (°)	Azimut (°)	Fläche (cm ²)
1	40.4	125.4	14.51
2	51.9	115.4	7.93
3	38.0	18.3	3.29
4	22.2	332.1	3.88
5	27.6	115.3	10.42
6	37.8	92.8	9.78
7	27.3	300.2	8.51
8	13.5	256.9	10.61
9	22.0	28.9	7.02
10	40.1	261.1	9.42
11	29.6	269.8	2.92
12	24.4	261.2	5.77
13	37.0	77.1	4.73
14	23.7	286.7	6.72
15	32.5	246.2	3.87
MR	3.5	8.6	--
EB	7.5	251.5	--

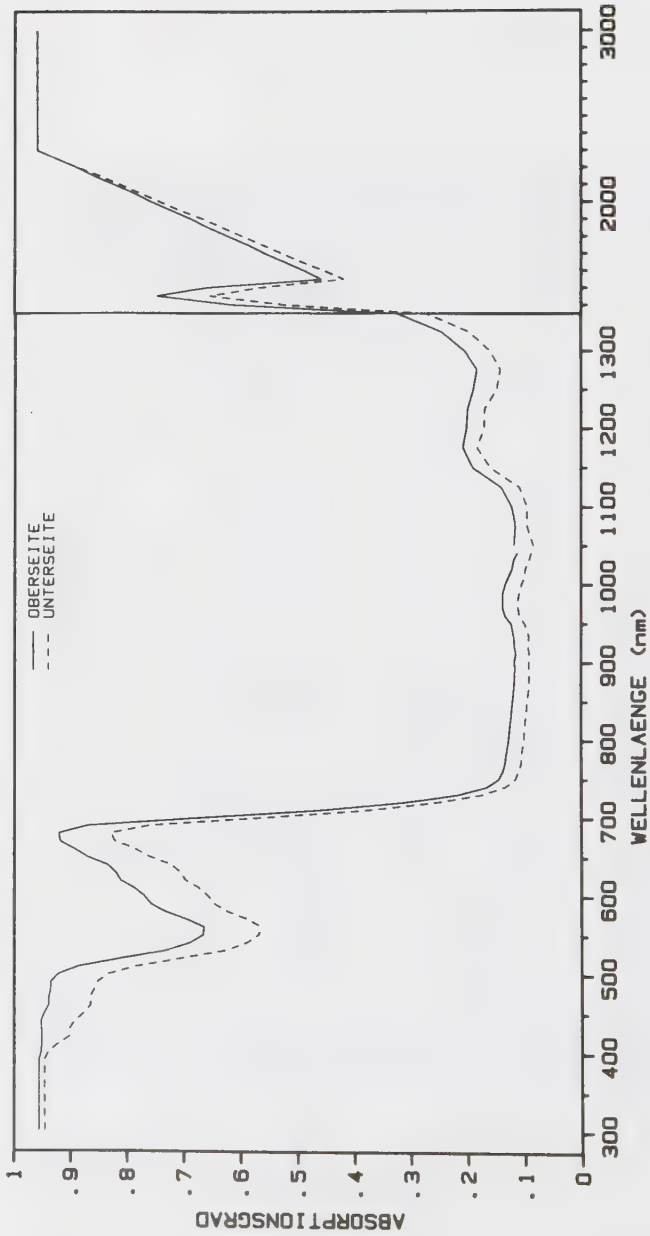


Abb. IV.12: Absorptionsgrad der Ober- und Unterseite des Aubergineblattes

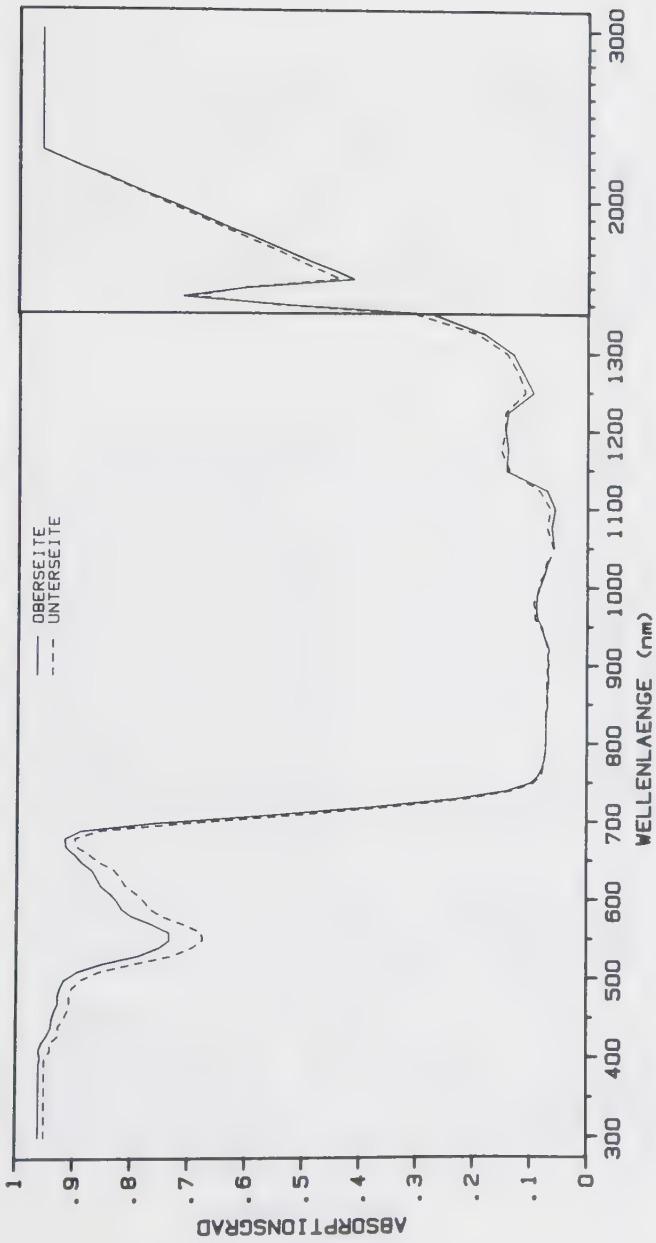


Abb. IV.13: Absorptionsgrad der Ober- und Unterseite des Feigenblattes

Blattes (Oberseite) verwendet. Da in beiden Fällen das Blatt konkav nach oben gekrümmt und der mittlere Neigungswinkel nicht extrem gross war, stammte die auf die Blattoberseite auftreffende Reflexionsstrahlung im wesentlichen vom Blatt selbst. Die entsprechenden Reflexionseigenschaften sind in der Abbildung IV.14 dargestellt. Die Werte von 1500 - 3000 nm wurden der durchschnittlichen Reflexionskurve für Vegetationen, wie sie von Wolfe und Zissis (1978) angegeben werden, entnommen. Für die Reflexionsstrahlung auf die Blattunterseiten wurde der Reflexionsdatensatz ALLSOIL (Abschnitt III.2.) verwendet.

IV.3.2. Sättigungskurven

Die an den eben ausgelegten Blättern gemessenen Sättigungskurven sind in den Abbildungen IV.15 - IV.18 zusammen mit den an den gemessenen Verlauf angepassten rechtwinkligen Hyperbeln dargestellt. Für das Auberginenblatt wurden die Photosyntheseraten einerseits auf die Bestrahlungsstärke in ($W\ m^{-2}$) und andererseits auf die absorbierten Quanten in ($\mu mol\ m^{-2}\ s^{-1}$) bezogen. Für die Resultate ergaben sich keine wesentlichen Unterschiede, was vorallem auf die im Laufe des Tages qualitativ gleichbleibende spektrale Zusammensetzung der Globalstrahlung zurückzuführen ist. Das zwischen 360 und 430 $W\ m^{-2}$ bzw. 650 und 775 $\mu mol\ m^{-2}\ s^{-1}$ beobachtete Ansteigen der Photosyntheserate wurde ziemlich sicher durch die Erhöhung des Blatteleitwertes und der Blattemperatur verursacht. Da bei der Messung am gebogenen Blatt der Blatteleitwert und die Blattemperatur immer unter den betreffenden Werten des eben ausgelegten Blattes lag (für den Blatteleitwert s. Abb. IV.20), wurden diese Werte bei der Kurvenanpassung nicht berücksichtigt. Der Wert bei 106 $\mu mol\ m^{-2}\ s^{-1}$ diente nur als ungefähre Markierung des Kurvenverlaufs. Er liegt vermutlich zu tief, da die Messung am späteren Nachmittag durch aufziehende Bewölkung gestört wurde und nur lückenhaft ist.

Beim Feigenblatt wurden die Berechnungen in Abhängigkeit der absorbierten Quanten durchgeführt. Es konnte ein vollständiger Tagesgang sowohl für das gebogene wie das ebene Blatt gemessen werden. Es zeigte sich hier auch, dass das Blatt ein gewisses Hystereseverhalten aufweist, d.h. am Morgen und am Nachmittag nicht derselben Sättigungskurve folgt. Ein Vergleich mit den

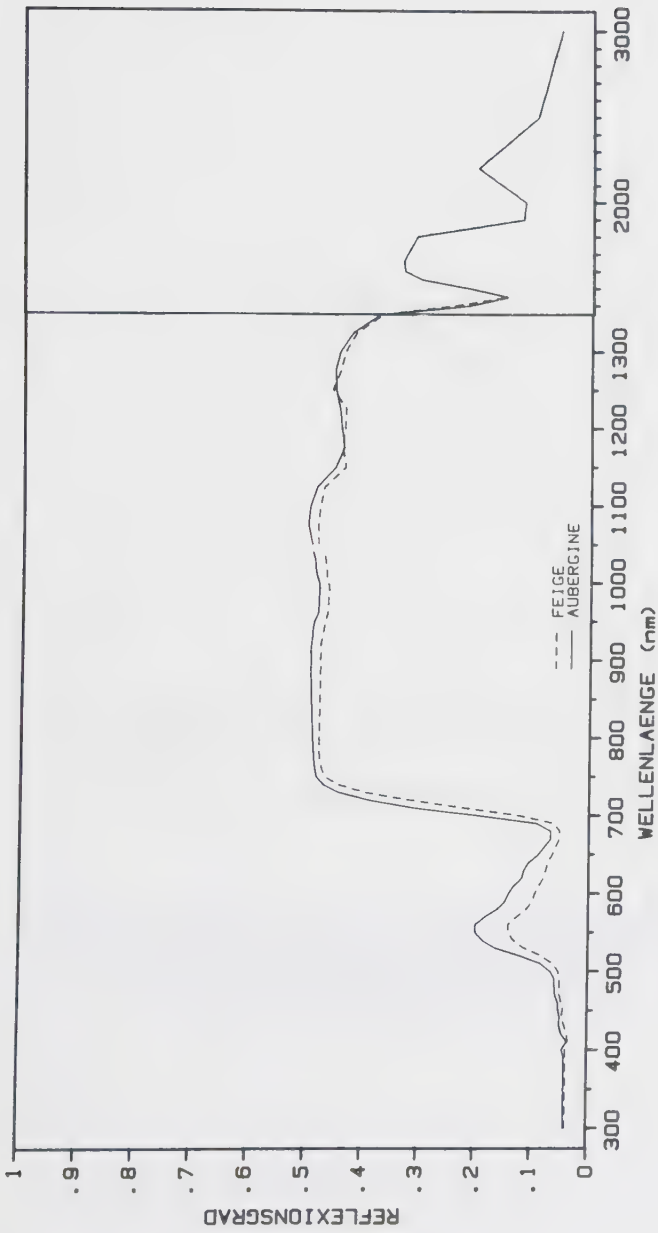


Abb. IV.14: Reflexionsgrad der Oberseiten des Aubergine- und des Feigenblattes

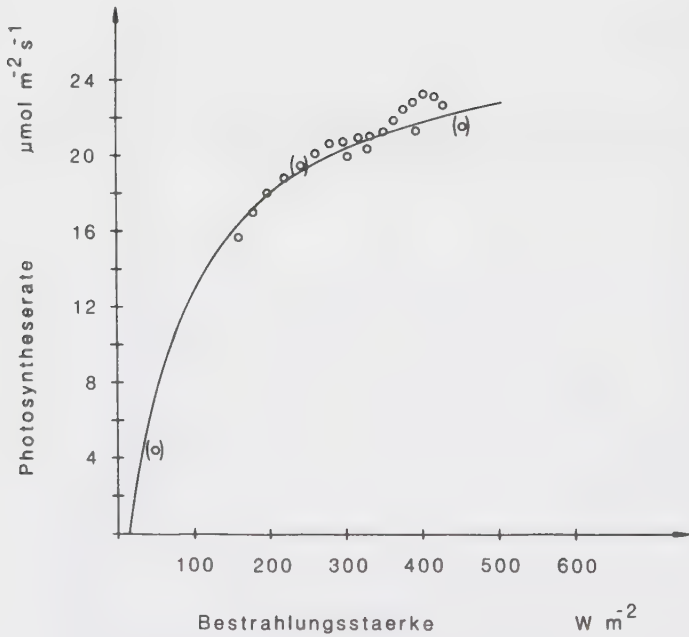


Abb. IV.15: Gemessenen Sättigungskurve des Aubergineblattes in Abhängigkeit der Bestrahlungsstärke mit angepasster Hyperbel; Hyperbelparameter:
 $a = 0.01258$, $b = 0.4050$ und $r = 5.094$

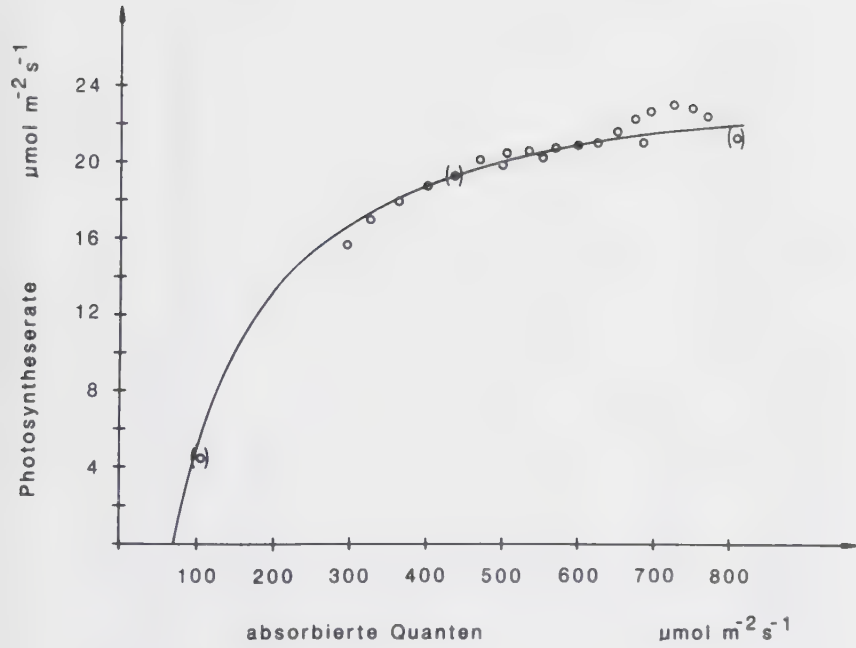


Abb. IV.16: Gemessene Sättigungskurve des Aubergineblattes in Abhängigkeit der absorbierten Quanten mit angepasster Hyperbel; Hyperbelparameter:
 $a = 0.01825$, $b = 1.0805$ und $r = 33.21$

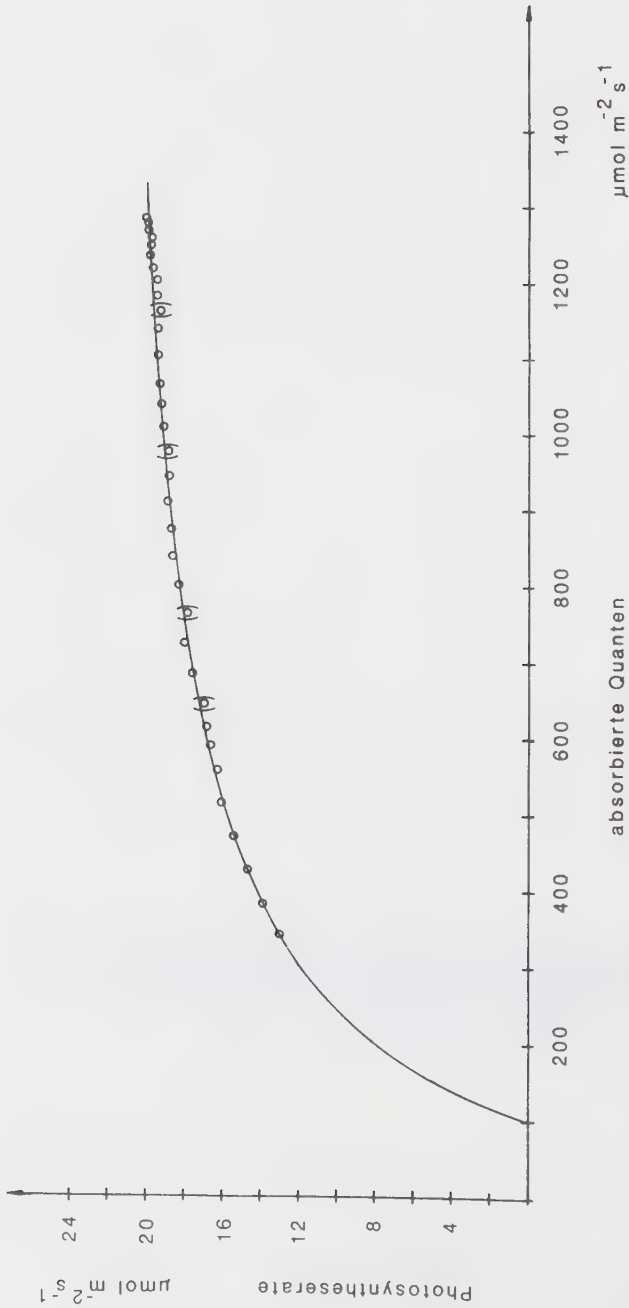


Abb. IV.17: Gemessene Sättigungskurve des Feigenblattes am Nachmittag in Abhängigkeit der absorbierten Quanten mit angepasster Hyperbel;
Hyperbelparameter: $a = 0.01190$, $b = 0.5998$ und $r = 27.38$

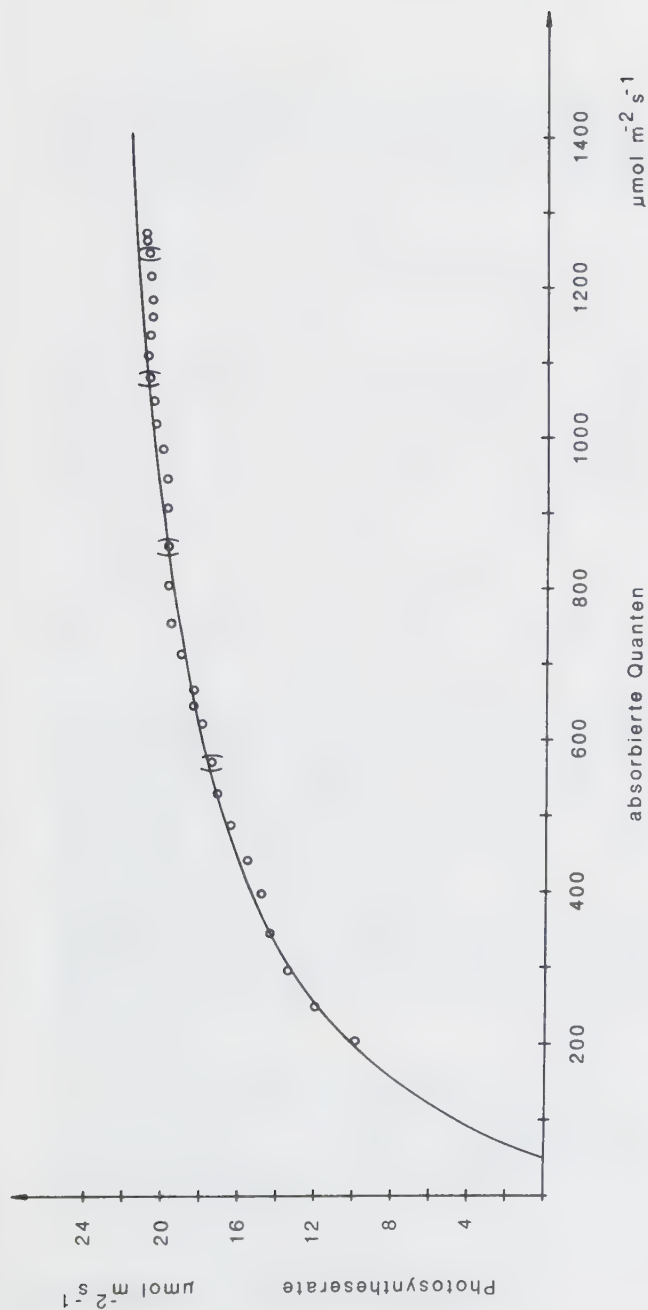


Abb. IV.18: Gemessene Sättigungskurve des Feigenblattes am Morgen in Abhängigkeit der absorbierten Quanten mit angepasster Hyperbel;
Hyperbelparameter: $a = 0.005577$, $b = 0.1816$ und $r = 7.103$

Darstellungen IV.22 und IV.24 zeigt, dass der Verlauf von Blattertemperatur, Wassersättigungsdefizit und Blattleitwert sehr verschieden für Vormittag und Nachmittag sind. Für die Berechnungen am gebogenen Blatt wurde daher die der Tageszeit entsprechende Sättigungskurve verwendet.

IV.3.3. Gemessene und berechnete Photosyntheseraten der nicht-ebenen Blätter

Die Photosynthese des Auberginen- bzw. des Feigenblattes wurde einerseits für das ganze Blatt mit der Gaswechselanlage gemessen und andererseits als Summe der Photosynthese der einzelnen Teilflächen berechnet. Die Berechnung erfolgte unter Verwendung der Sättigungskurven als gewichtetes Mittel entsprechend den Anteilen der Teilflächen. Für die Berechnung der Bestrahlungsstärken wurden, wie in Abschnitt III.5. beschrieben, die berechneten Werte für horizontale Exposition durch Variation der Sichtweite den vom Solarimeter gemessenen Werten angepasst. Die Abweichungen betragen im Schnitt 1%, was dem Messfehler der Solarimeterwerte entspricht. Die Differenz zu den vom Quantenfühler gemessenen Werten ist mit 3 - 5 % grösser, was als Folge der geringeren Messgenauigkeit des Quantenfühlers zu erwarten ist. Für den Vergleich Messung - Berechnung musste noch eine zeitliche Korrektur von ca. 6 Minuten berücksichtigt werden, die durch die verzögerte Messung der CO_2 -Konzentration im UNOR verursacht wurde. Die Messungen und Berechnungen sind in den Abbildungen IV.19, IV.21 und IV.23 dargestellt. Bei den Berechnungen wurden keine Korrekturen der Photosyntheserate bei grösseren Einfallswinkeln der direkten Sonnenstrahlung, wie sie von Seibert (1984) empfohlen werden, angebracht. Einerseits ist der Verlauf der Sättigungskurven ebenfalls von dem sich ändernden Einfallswinkel betroffen und andererseits gilt hier auch die Feststellung, die im Zusammenhang mit der Abhängigkeit der Absorptionseigenschaften vom Einfallswinkel (s. IV.3.1.) gemacht wurde.

Um die Übereinstimmung von Messung und Berechnung beurteilen zu können, ist es notwendig den Verlauf von Blattertemperatur, Wassersättigungsdefizit zwischen Luft und Blatt und den Blattleitwert bei der Messung der Sättigungskurve und bei der

Messung am gebogenen Blatt zu vergleichen, da diese Grössen die Photosyntheserate wesentlich beeinflussen können, ohne dass ein direkter Zusammenhang mit der Bestrahlungsstärke besteht. In den Abbildungen IV.20, IV.22 und IV.24 sind die am gebogenen Blatt gemessenen Tagesgänge dieser Grössen durch Symbole ($\diamond$) dargestellt. Als durchgezogene Kurven sind die für dieselben Bestrahlungsstärken gültigen Werte des eben ausgelegten Blattes eingetragen. Auf diese Weise werden die Unterschiede der drei Grössen bei derselben Bestrahlungsstärke pro Blattflächeneinheit deutlich und der direkte Vergleich mit den gemessenen und berechneten Tagesgängen der Photosynthesraten möglich. Auf eine Darstellung der Transpirationsrate wurde verzichtet, da sie bereits im Blattleitwert enthalten ist und in diesem Zusammenhang keine zusätzliche Aussage bringt. Wie aus den Abbildungen IV.19 - IV.24 hervorgeht, stimmen dann die berechneten Werte mit den gemessenen überein, wenn die oben erwähnten Parameter vergleichbar sind.

IV.3.4. Gegenüberstellung der Photosyntheseraten und Bestrahlungsstärken der nicht-ebenen Blätter mit ebenen derselben Mittelrippenstellung im Tagesgang

Die berechneten Tagesgänge der Photosynthesraten und Bestrahlungsstärken für die gebogenen Blätter und für die ebenen derselben Mittelrippenstellung sind in den Abbildungen IV.25 - IV.27 dargestellt. Obwohl für das Auberginenblatt die Messung nur ab 14⁵⁰ Uhr vorlag, wurde der Verlauf der Beschattung über den ganzen Tag registriert, so dass die Berechnung des vollständigen Tagesgangs durchgeführt werden konnte.

Als Kriterium für die Erreichung der Sättigung wurde angenommen, dass über dieser Bestrahlungsstärke die Photosyntheserate bei einer zusätzlichen Absorption von $100 \mu\text{mol}_\text{q}\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ um weniger als 2 % zunimmt. Es ergeben sich die folgenden Werte für die drei Sättigungskurven:

850	$\text{mol}_\text{q}\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$	bei Aubergine,
1000	"	bei Feige am Nachmittag,
1050	"	bei Feige am Vormittag.

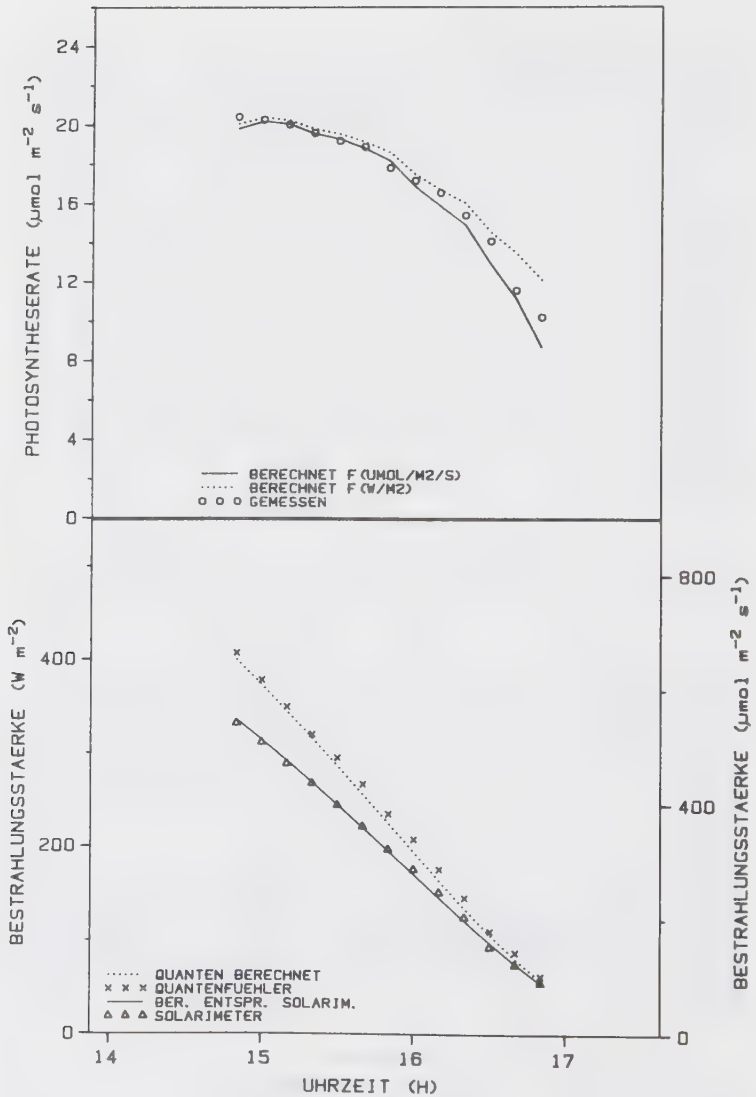


Abb. IV.19: Gemessene und berechnete Photosyntheseraten des Aubergineblattes und gemessene und berechnete horizontale Bestrahlungsstärken

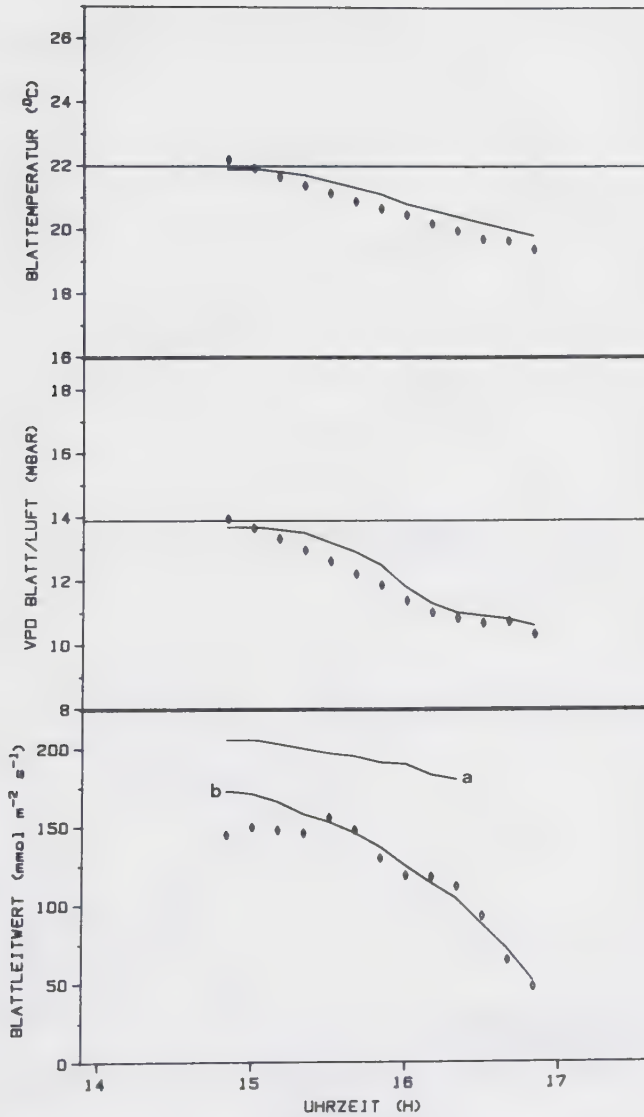


Abb. IV.20: Blattemperatur, Wassersättigungsdefizit und Blatteleitwert des nicht-ebenen Aubergineblattes (◊) und entsprechende Werte des eben ausgelegten Blattes (—) bei denselben Bestrahlungsstärken (a) Morgen, b) Nachmittag). Die horizontalen Linien entsprechen den Werten des Küvettenklimas

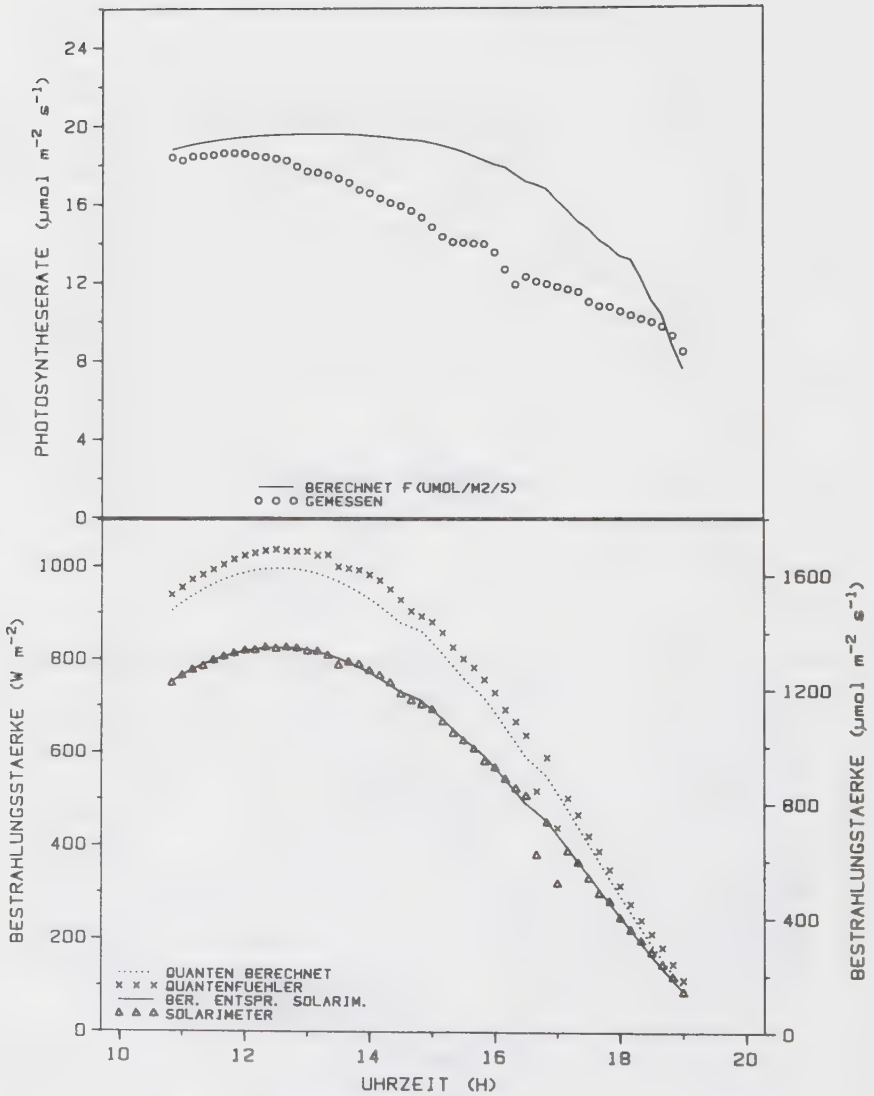


Abb. IV.21: Gemessene und berechnete Photosyntheseraten des Feigenblattes am Nachmittag und gemessene und berechnete horizontale Bestrahlungsstärken

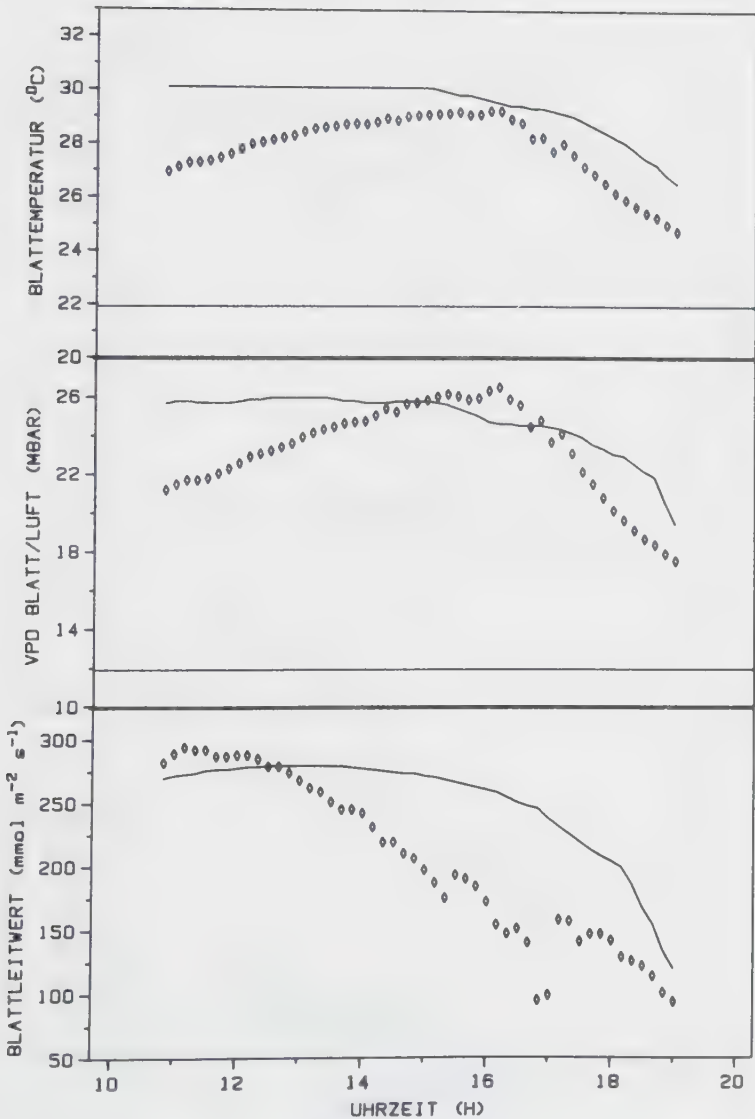


Abb. IV.22: Blattemperatur, Wassersättigungsdefizit und Blatteleitwert des nicht-ebenen Feigenblattes (◊) und entsprechende Werte des eben ausgelegten Blattes (—) bei denselben Bestrahlungsstärken am Nachmittag. Die horizontalen Linien entsprechen den Werten des Küvettenklimas

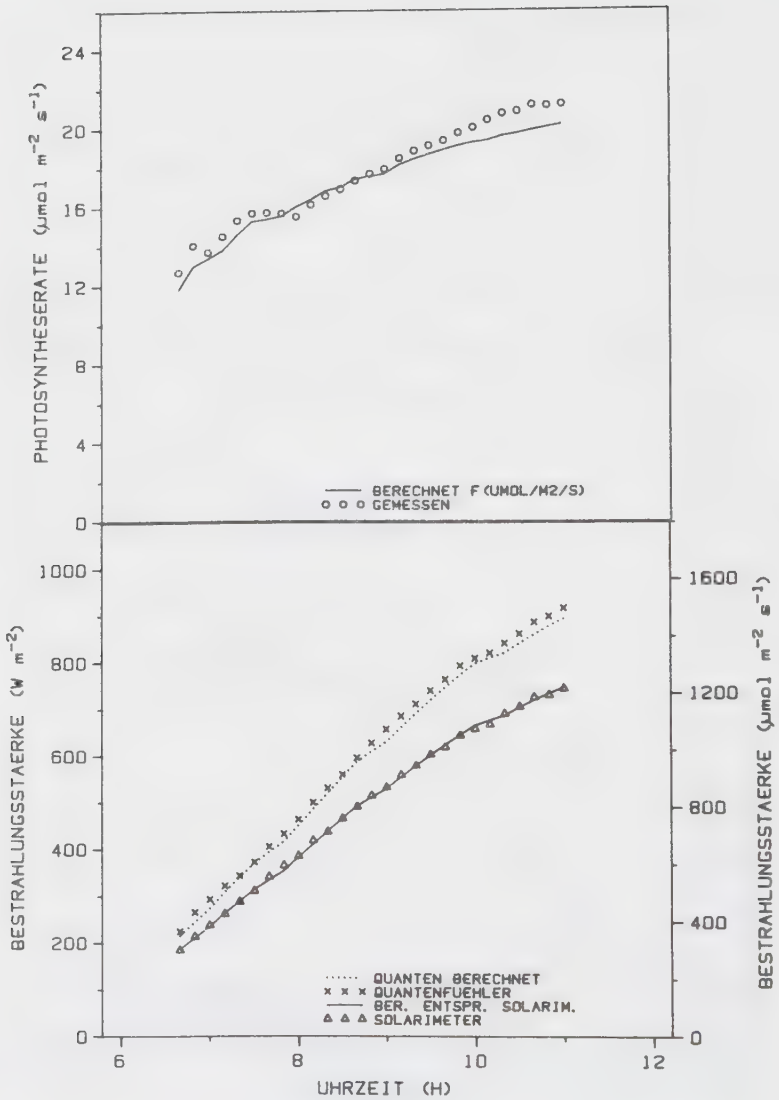


Abb. IV.23: Gemessene und berechnete Photosyntheseraten des Feigenblattes am Vormittag und gemessene und berechnete horizontale Bestrahlungsstärken

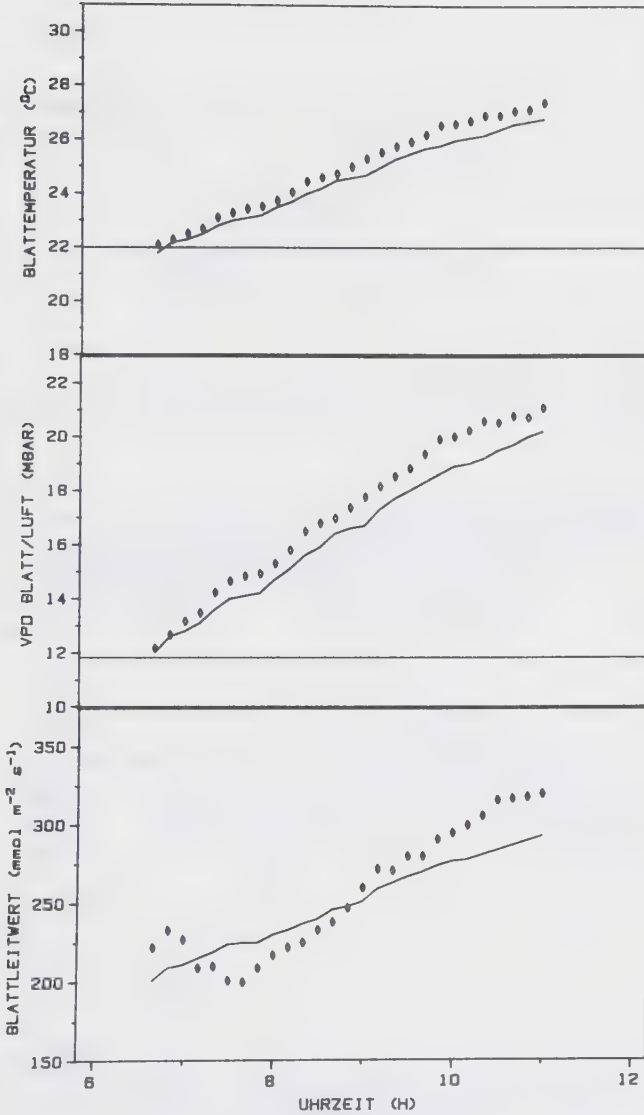


Abb. IV.24: Blattemperatur, Wassersättigungsdefizit und Blatteleitwert des nicht-ebenen Feigenblattes (◊) und entsprechende Werte des eben ausgelegten Blattes (—) bei denselben Bestrahlungsstärken am Vormittag. Die horizontalen Linien entsprechen den Werten des Küvettenklimas

Als weitere Grösse für die Beurteilung der Unterschiede wurde der photosynthetische Ausnützungskoeffizient Φ herangezogen, der durch

$$\Phi = \frac{t_1 \dots t_2 \text{ Nettophotosyntheserate } dt}{t_1 \dots t_2 \text{ abs. Quantenbestrahlungsstärke } dt} \quad (\text{IV.15})$$

mit $t_1 \dots t_2$ = Zeitintervall

gegeben ist. Die Einheit von Φ ist ($\text{molCO}_2/\text{molQUANTEN}$). Die entsprechenden Werte für die drei betrachteten Zeitabschnitte sind in Tabelle IV.3 zusammengestellt.

Tabelle IV.3.: Photosynthetische Ausnützungskoeffizienten der gemessenen und berechneten Photosyntheseraten. (Φ_G : gemessen, Φ_B : berechnet für gebogenes Blatt; $\Phi_{B/E}$: berechnet für ebenes Blatt in Mittelrippenstellung)

Blatt	Zeitspanne ($t_1 - t_2$)	Φ_G	Φ_B	$\Phi_{B/E}$
Aubergine	7 ³⁰ - 17 ⁰⁰	-----	0.032	0.028
Feige (Na)	10 ⁵⁰ - 19 ⁰⁰	0.016	0.019	0.018
Feige (Mo)	6 ⁴⁰ - 11 ⁰⁰	0.026	0.025	0.023

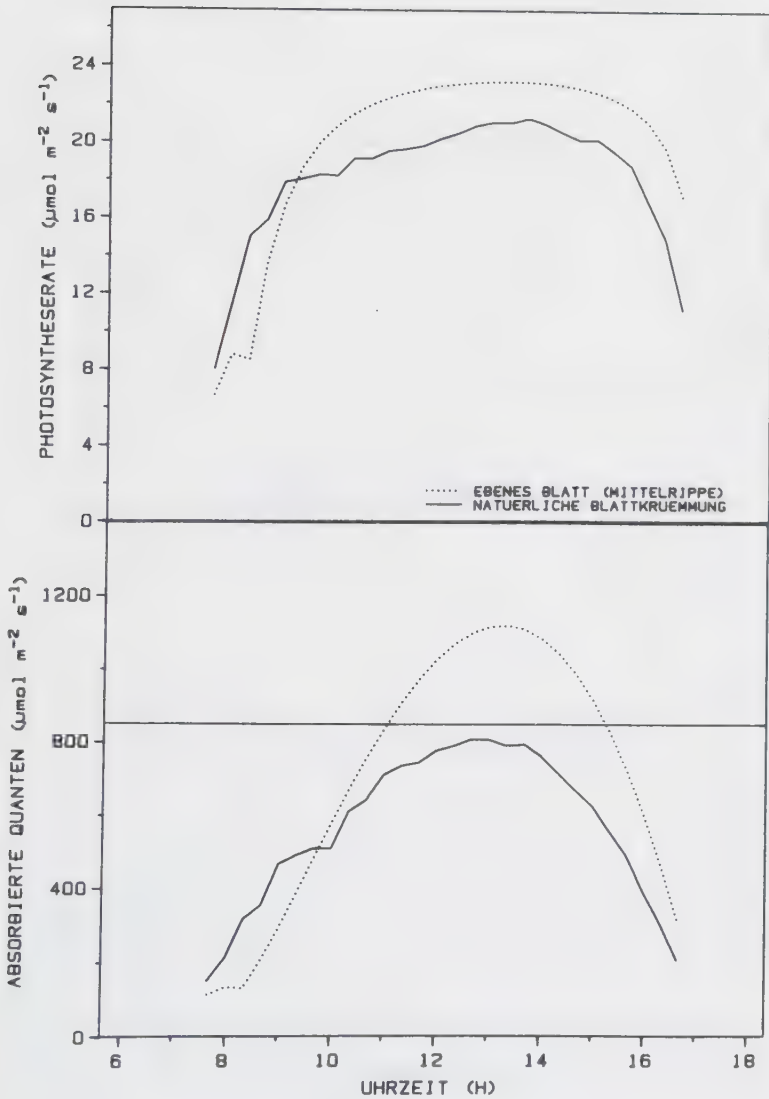


Abb. IV.25: Berechnete Tagesgänge der Photosyntheseraten und der absorbierten Quanten für das nicht-ebene Aubergineblatt (gewichtetes Mittel) und ein ebenes Blatt derselben Mittelrippenstellung. Die horizontale Linie entspricht dem sättigenden Wert der absorbierten Quanten

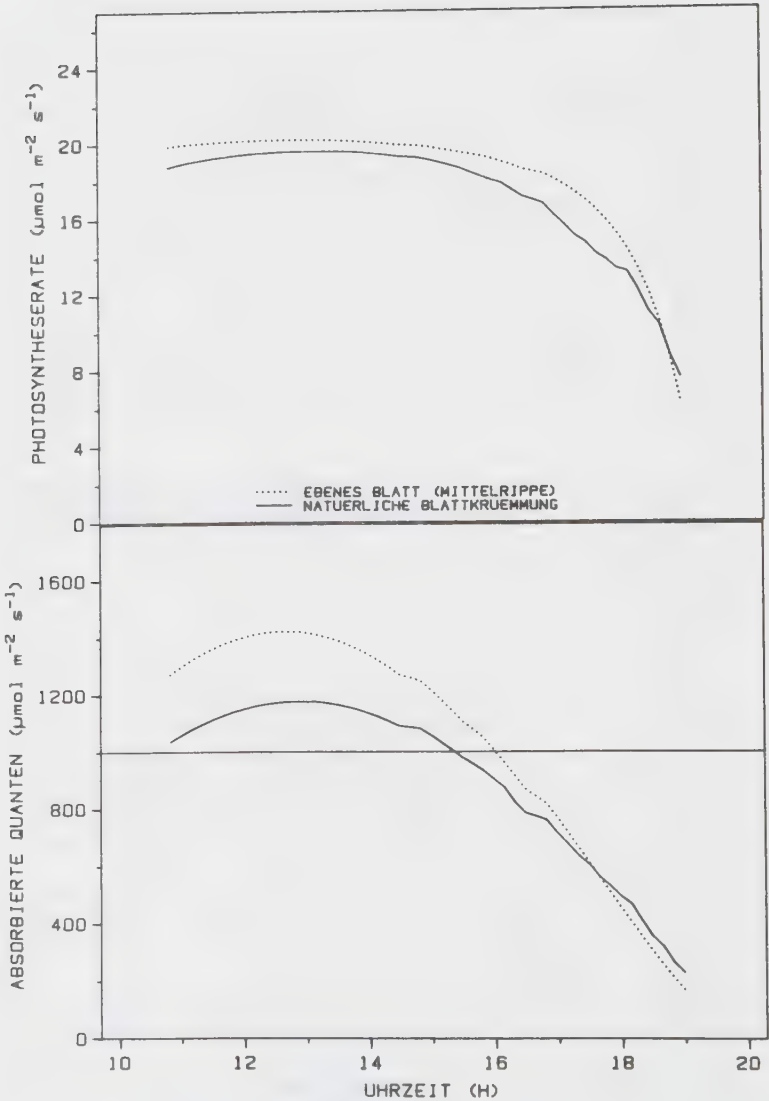


Abb. IV.26: Berechneter Verlauf der Photosyntheseraten und der absorbierten Quanten während der Nachmittagsmessung für das nicht-ebene Feigenblatt (gewichtetes Mittel) und ein ebenes Blatt derselben Mittelrippenstellung. Die horizontale Linie entspricht dem sättigenden Wert der absorbierten Quanten

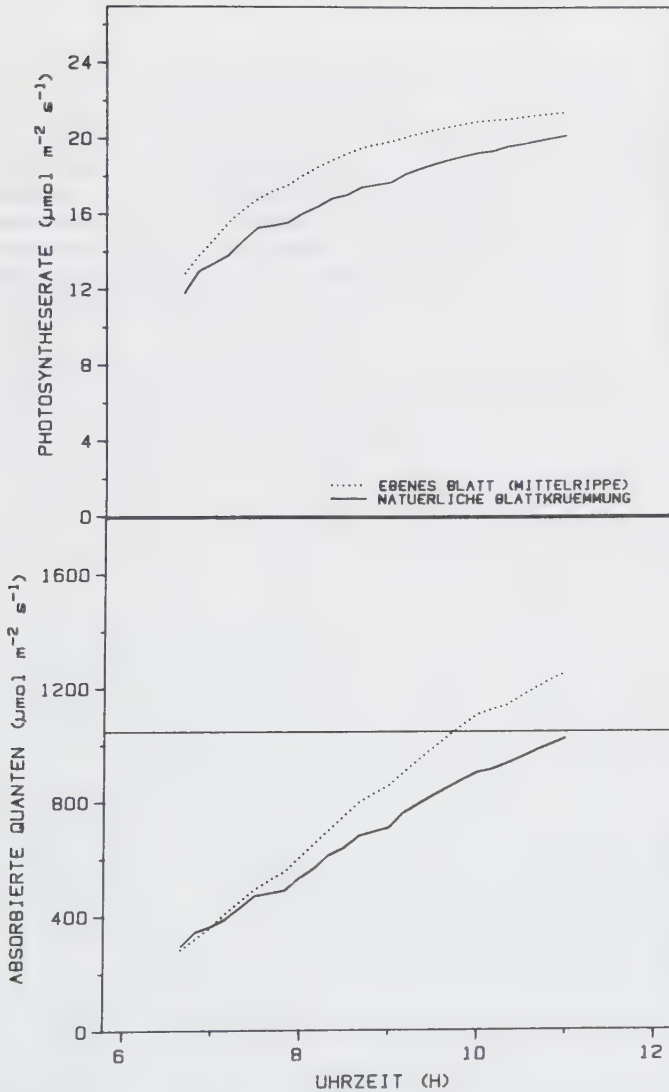


Abb. IV.27: Berechneter Verlauf der Photosyntheseraten und der absorbierten Quanten während der Vormittagsmessung für das nicht-ebene Feigenblatt (gewichtetes Mittel) und ein ebenes Blatt derselben Mittelrippenstellung. Die horizontale Linie entspricht dem sättigenden Wert der absorbierten Quanten

IV.4. Diskussion und Schlussfolgerungen

Für die gemessenen und die berechneten Photosyntheseraten in den Abbildungen IV.19, IV.21 und IV.23 kann, abgesehen von den Werten gegen Tagesende, wo der Fehler für Messung und Berechnung rasch grösser wird, eine Unsicherheit zwischen 5 - 10 % angenommen werden. Der absolute Fehler, der den Kurven anhaftet, ist sicher grösser. Da aber die Sättigungskurve und die Gaswechsellmessungen von der Anlage her unter denselben Bedingungen gemessen wurden, bewirkt der absolute Fehler höchstens eine für alle Kurven gleiche, vertikale Verschiebung. Auf Grund dieser Überlegungen kann festgestellt werden, dass Messung und Berechnung für das Auberginenblatt und das Feigenblatt am Morgen gut übereinstimmen. Dies gilt jedoch nicht für die Nachmittagswerte des Feigenblattes. Ein Vergleich mit den Abbildungen IV.25 und IV.27 zeigt auch, dass die Auswirkungen, verursacht durch die Blattkrümmung und die damit verbundene Beschattung gegenüber dem Kurvenverlauf eines ebenen Blattes deutlich und grösser sind, als die erwähnten Unsicherheiten.

Bei der Nachmittagsmessung am Feigenblatt tritt offenbar ein teilweiser Stomaschluss ein, wie der Verlauf des Blattleitwertes in Abbildung IV.22 zeigt. Auch die Blattemperatur und das Wassersättigungsdefizit weisen gegenüber dem eben ausgelegten Blatt einen stark abweichenden Verlauf auf. Der Stomaschluss kann nicht auf eine schlechte Wasserversorgung im Topf zurückzuführen sein, da die Versuchspflanze jeden Morgen kontrolliert und gegossen wurde. Ein derartiger Stomaschluss wurde auch bei anderen Feigenblättern beobachtet und ist möglicherweise auf ein ähnliches Verhalten, wie das von Lange und Meyer (1979) bei Aprikose (*Prunus armeniaca*) und Wein (*Vitis vinifera*) untersucht wurde, zurückzuführen. Nicht klar ist in diesem Zusammenhang, warum bei den Messungen am eben ausgelegten Blatt kein Stomaschluss auftrat. Bei einer weiteren Messung am eben ausgelegten Blatt, am Nachmittag des 30. Juli, war ebenfalls kein Stomaschluss beobachtet worden.

Aus den Ergebnissen in den Abbildungen IV.19, IV.21 und IV.23 lässt sich schliessen, dass die Photosyntheserate eines nicht-ebenen Blattes durchaus aus der am eben ausgelegten Blatt gemessenen Sättigungskurve und den Bestrahlungsstärken (in

auftreffenden $W \text{ m}^{-2}$ oder absorbierten Quanten) der durch Ebenen approximierten Teilflächen berechnet werden kann, sofern bezüglich der Blattparameter wie Blattemperatur, Wassersättigungsdefizit und Blattleitwert ein ähnliches Verhalten gewährleistet ist. Abweichungen sind vor allem dort zu beobachten, wo diese Werte sich stärker unterscheiden, ausser bei der schon erwähnten Feigenmessung ist dies auch bei der vormittäglichen Feigenmessung zu beobachten. Bei der Auberginemessung konnte dies schon zum Teil durch die Wahl des Sättigungskurvenverlaufes berücksichtigt werden.

Der Vergleich der Photosyntheseraten der gebogenen Blätter mit denjenigen der ebenen Blätter in Mittelrippenstellung ergibt, wie in den Abbildungen IV.25 - IV.27 zu sehen ist, dass die Werte für die ebenen Blätter generell höher liegen. Vergleicht man aber die entsprechenden Tagesgänge der absorbierten Quantenbestrahlungsstärken bezüglich des sättigenden Wertes, so zeigt sich, dass dieser von den ebenen Blättern viel weiter und über eine längere Zeitperiode überschritten wird. Das gebogene Auberginenblatt bleibt sogar während des ganzen Tages unterhalb dieses Wertes. Es ist hierbei jedoch zu beachten, dass die Messung am 20. Oktober stattfand, zu einer Zeit bei der die maximalen Bestrahlungsstärken durch die tiefer werdenden Sonnenstände kleiner werden. Bei der Aubergine sind die berechneten Photosyntheseraten des gebogenen Blattes ab ca. 10³⁰ Uhr 10 bis 30 % tiefer als diejenigen des eben ausgelegten Blattes. Betrachtet man aber den photosynthetischen Ausnützungskoeffizienten, so zeigt sich, dass dieser für das gebogene Blatt deutlich höher ist als für das ebene, d.h. das ebene Blatt kann das den sättigenden Wert übersteigende Strahlungsangebot nicht ausnützen. Bei der Feige sind diese Verhältnisse weniger deutlich, was vermutlich auf die wesentlich geringere Krümmung des Feigenblattes im Vergleich zum Auberginenblatt (Abbildungen IV.8 und IV.9) zurückzuführen ist.

Die Blätter erreichen also in den hier untersuchten Fällen durch die Krümmung ihrer Blattspreite einen bezüglich des sättigenden Wertes günstigeren Verlauf der Bestrahlungsstärke im Tagesgang. Sie kann auch, wie das in Abbildung IV.25 vor 9⁰⁰ Uhr zu beobachten ist, eine "Verlängerung des Tages" bewirken, in dem Sinne, dass bei tiefen Sonnenständen noch eine grössere

Bestrahlungsstärke vorhanden ist. Vom gesamten Blatt her beurteilt, - es werden ja hier immer die gewichteten, mittleren Bestrahlungsstärken betrachtet -, bedeutet dies eine gleichmässigeren Verteilung der Bestrahlungsstärken im Laufe des Tages. Für einzelne Teilflächen können die Werte jedoch ebenso hoch werden, wie für das ebene Blatt. Das geschieht allerdings kurzfristiger und nie für die ganze Blattspreite gleichzeitig.

Zu beachten ist, dass die Photosynthese nicht nur vom Strahlungsgenuss sondern auch von der Blattemperatur abhängt. Eine eingehendere Beurteilung der sich ändernden Wärmeverhältnisse des Blattes ist allein auf Grund der hier dargestellten Ergebnisse nicht möglich. Es müssten dazu weitere Terme aus der Energiebilanzrechnung wie thermische Strahlung, Konvektion und Transpirationskühlung berücksichtigt werden. Zudem wäre es auch sinnvoll, wegen der oben erwähnten Verhältnisse für die einzelnen Teilflächen, die Blattemperatur am nicht-ebenen Blatt an verschiedenen Stellen zu messen. Die in den Abbildungen IV.20, IV.22 und IV.24 dargestellten Blattemperaturkurven sind auch keine vergleichbaren Tagesgänge zwischen einem ebenen und einem gebogenen Blatt, sondern nur als Information anzusehen, ob die Bedingungen für Messung und Berechnung einander entsprechen. Auf Grund der Kurven des Auberginenblattes und der Morgenmessung der Feige kann bei gleicher Bestrahlungsstärke etwa die gleiche Blattemperatur erwartet werden. D.h. durch die höheren maximalen Bestrahlungsstärken beim ebenen Blatt wird auch eine höhere Blattemperatur erreicht werden. Dieser Effekt dürfte unter den natürlichen Verhältnissen ausserhalb der Gaswechselkuvette, wo meistens auch kleinere Windgeschwindigkeiten herrschen, bedeutend ausgeprägter sein. Seibert et al. (1980) haben dies an Übertemperaturen von *Nerium oleander* L. innerhalb und ausserhalb der Gaswechselkuvette in Abhängigkeit von der Bestrahlungsstärke gezeigt. Die Blattkrümmung könnte also auch als Schutz gegen zu hohe Temperaturen interpretiert werden. In dieselbe Richtung weisen die Kurven der Feigen-Nachmittagmessung (Abb. IV.22). Obwohl der Verlauf für das ebene Blatt bis ca. 12³⁰ Uhr nicht repräsentativ ist, weil für diese Zeitspanne eigentlich die "Vormittagssättigungskurve" mit den entsprechenden Parametern benutzt werden müsste, und obwohl ein Stomaschluss nach dieser Zeit beim nicht-ebenen Blatt eintritt, liegen dessen Blattemperaturen immer unter denjenigen des eben ausgelegten Blattes.

Die hier dargestellten Untersuchungen deuten darauf hin, dass Blätter mit nicht-ebenen Blattspreiten in der Art der im Abschnitt IV.1 erwähnten Beispiele mit entsprechendem Photosyntheseverhalten, eine optimierende Orientierung ihrer Blattspreiten in Bezug auf die Photosyntheseraten und den Wärmehaushalt aufweisen. Um zu einer definitiven Aussage zu kommen, müssten die hier vorliegenden, ersten Ergebnisse durch Messungen an weiteren Species mit gekrümmten Blättern ergänzt werden. Diese Messungen müssten zudem Temperaturmessungen an mehreren Stellen der Blattspreite sowie Energiebilanzrechnungen mit einschliessen. Vom heutigen Stand der Messmethodik betrachtet dürften aber insbesondere bezüglich der Erfassung der thermischen Strahlungskomponenten, sowie des konvektiven Wärmeumsatzes noch erhebliche Schwierigkeiten zu überwinden sein.

V. ZUSAMMENFASSUNG

Mit dem Rechenprogramm SOL wurde die Möglichkeit geschaffen, Bestrahlungsstärke und absorbierte Anteile der Globalstrahlung beliebig orientierter Flächen in spektraler Verteilung zu berechnen. Die Berechnungen können für einen beliebigen Tag oder Zeitpunkt und für einen beliebigen Ort der Erdoberfläche durchgeführt werden. Wie an Hand verschiedener Vergleichsrechnungen gezeigt werden konnte, beschreiben bei klaren Witterungsverhältnissen und nicht zu starken Trübungen die berechneten Werte die tatsächlichen Globalstrahlungswerte sehr gut. Es können die Reflexionseigenschaften der Umgebung, Transmissionseigenschaften für die Berechnung von transmittierter Strahlung und die Absorptionseigenschaften eines Blattes oder einer anderen absorbierenden Fläche berücksichtigt werden.

Als Anwendung des Programms wurde der Strahlungsgenuss junger und älterer Pflanzen von *Aloe dichotoma* Masson, die sich durch einen Blattdimorphismus unterscheiden, untersucht. Der Vergleich beruhte auf Strahlungsmessungen, die in Südafrika durchgeführt wurden.

Aus diesen und anderen Vergleichen ergibt sich: sollen Berechnungen mit dem Ziel durchgeführt werden, die an einem bestimmten Tag erfassten Messwerte zu ergänzen und zu erweitern, wird empfohlen die Globalstrahlung auf eine horizontal exponierte Empfängerfläche zu messen. Durch Variation der Sichtweite können die Berechnungen für horizontale Exposition an die gemessenen Werte angepasst werden.

Im zweiten Teil der Arbeit wird mit Hilfe des Rechenprogramms SOL und den an den eben ausgelegten Blättern gemessenen Sättigungskurven die Photosyntheseleistung nicht-ebener Blattflächen der beiden C_3 -Pflanzen Aubergine und Feige berechnet und mit gemessenen Werten verglichen. Es zeigt sich, dass die Berechnung einer direkten Messung äquivalent ist, sofern die Parameter sowohl der Umgebung als auch der Pflanze mit den entsprechenden Verhältnissen bei der Messung der Sättigungskurve hinreichend genau übereinstimmen.

Im weiteren wird die Auswirkung des durch die Blattkrümmung verursachten veränderten Strahlungsgenusses im Vergleich zu ebenen Blättern derselben Mittelrippenstellung untersucht. Es wird festgestellt, dass durch die Krümmung der Blattfläche ein gleichmässigerer Verlauf der Bestrahlungsstärke des Blattes im Tagesgang erreicht wird. Der Tagesverlauf der Bestrahlungsstärke liegt für die beiden untersuchten, gebogenen Blätter bezüglich des sättigenden Wertes der Bestrahlungsstärke bedeutend günstiger. Ein Vergleich des Temperaturverlaufs bei gleichen Bestrahlungsstärken bei den eben ausgelegten bzw. gekrümmten Blättern lässt vermuten, dass die Blattkrümmungen bezüglich der Photosynthese und des Wärmehaushaltes optimiert sind.

VI. ANHANG: LISTE DER PROGRAMMANWEISUNGEN DES RECHENPROGRAMMS SOL

```

/**PROG SOL**/
/*******
**
**PROGRAMM SOL VERSION 3-5-85/FLACH
**
**BERECHNUNG DER DIREKTEN SOMMENSTRAHLUNG, DER HIMMELS-
**STRAHLUNG, DER REFLEKTIERTEN STRAHLUNG UND
**DER GLOBALSTRAHLUNG FUER EINE BELIEBIG ORIEN-
**TIERTE FLAECHE,
**ALS TRANSMITIERTE UND/ODER ABSORBIERTE
**STRAHLUNG.
**
**SPEKTRALBEREICH: 220 - 3000 NM,
**SPEKTRALE VERTEILUNG,
**
**INTEGRATION VERSCHIEDENER WELLENLAENGENBEREICHE:
**
**QUANTEN IM BEREICH 400 - 700 NM (PARP)
**
**FUER BERECHNUNG UEBER ZEITSPANNE: ZEITLICHE
**INTEGRATION
**
**EINGABE VIA JOB CONTROL :
**
**DATUM
**
**ZEIT (ANFANG, ENDE, INTERVALL) UND GEOGR. LAGE
**ODER:
**ZENITDISTANZ DER SONNE, SIN(AZIMUT), COS(AZIMUT)
**
**HOEHE DER EMPFAENGERFLAECHE UEBER NM
**
**SICHTWEITE
**
**ZU BERECHNENDE STRAHLUNGSART
**
**NEIGUNGSWINKEL UND AZIMUT DER EMPFAENGERFLAECHE
**
**HORIZONTEINENGDUNG UND HIMMELSABDECKUNG
**
**EINGABE ALS FILE:
**
**ATMOSPHAERENMODELL
**
**AEROSOLMODELL
**
**REFLEXIONSEIGENSCHAFTEN FUER REFL.STRAHLUNG
**
**TRANSMISSIONSEIGENSCHAFTEN
**
**ABSORPTIONSEIGENSCHAFTEN (EMPF.FLAECHE)
**
**
**FILE-AUSGABE:
**
**GEMITTELTE SPEKTRALE VERTEILUNG (ISCO-SPEKTR.)
**
**
*****
1 0 SOL: PROC OPTIONS (MAIN);
2 1 0 DCL LAMBDA(1:165) FLOAT INIT
(
220.0, 225.0, 230.0, 235.0, 240.0, 245.0, 250.0,
255.0, 260.0, 265.0, 270.0, 275.0, 280.0, 285.0,
290.0, 295.0, 300.0, 305.0, 310.0, 315.0, 320.0,
325.0, 330.0, 335.0, 340.0, 345.0, 350.0, 355.0,
360.0, 365.0, 370.0, 375.0, 380.0, 385.0, 390.0,
395.0, 400.0, 405.0, 410.0, 415.0, 420.0, 425.0,
430.0, 435.0, 440.0, 445.0, 450.0, 455.0, 460.0,
465.0, 470.0, 475.0, 480.0, 485.0, 490.0, 495.0,
500.0, 505.0, 510.0, 515.0, 520.0, 525.0, 530.0,
535.0, 540.0, 545.0, 550.0, 555.0, 560.0, 565.0,
570.0, 575.0, 580.0, 585.0, 590.0, 595.0, 600.0,
605.0, 610.0, 620.0, 630.0, 640.0, 650.0, 660.0,
670.0, 680.0, 690.0, 700.0, 710.0, 720.0, 730.0,
740.0, 750.0, 760.0, 770.0, 780.0, 790.0, 800.0,
810.0, 820.0, 830.0, 840.0, 850.0, 860.0, 870.0,
880.0, 890.0, 900.0, 910.0, 920.0, 930.0, 940.0,
950.0, 960.0, 970.0, 980.0, 990.0, 1000.0, 1025.0,
1050.0, 1075.0, 1100.0, 1125.0, 1150.0, 1175.0, 1200.0,
1225.0, 1250.0, 1275.0, 1300.0, 1325.0, 1350.0, 1400.0,
1450.0, 1500.0, 1550.0, 1600.0, 1650.0, 1700.0, 1750.0,
1800.0, 1850.0, 1900.0, 1950.0, 2000.0, 2050.0, 2100.0,
2150.0, 2200.0, 2250.0, 2300.0, 2350.0, 2400.0, 2450.0,
2500.0, 2550.0, 2600.0, 2650.0, 2700.0, 2750.0, 2800.0,
2850.0, 2900.0, 2950.0, 3000.0);
3 1 0 DCL EXSOL(1:165) FLOAT INIT
(
58.2, 63.2, 58.3, 57.4, 61.8, 63.9, 60.8,
90.9, 138.0, 211.0, 242.0, 203.0, 215.0, 293.0,
445.0, 519.0, 503.0, 592.0, 660.0, 729.0, 756.0,
878.0, 990.0, 922.0, 910.0, 924.0, 985.0, 990.0,
968.0, 1118.0, 1133.0, 1105.0, 1072.0, 997.0, 1031.0,
1184.0, 1479.0, 1690.0, 1700.0, 1727.0, 1728.0, 1668.0,
1593.0, 1676.0, 1880.0, 1934.0, 1998.0, 2038.0, 2046.0,
2023.0, 1999.0, 2016.0, 2032.0, 1934.0, 1895.0, 1959.0,
1921.0, 1911.0, 1929.0, 1837.0, 1824.0, 1871.0, 1876.0,
1900.0, 1876.0, 1865.0, 1878.0, 1857.0, 1844.0, 1847.0,
1846.0, 1842.0, 1848.0, 1815.0, 1785.0, 1793.0, 1772.0,
1799.0, 1736.0, 1696.0, 1668.0, 1680.0, 1593.0, 1525.0,
1535.0, 1496.0, 1458.0, 1812.0, 1391.0, 1347.0, 1331.0,
1288.0, 1271.0, 1284.0, 1204.0, 1189.0, 1165.0, 1180.0,
1114.0, 1085.0, 1065.0, 1043.0, 986.0, 987.0, 956.0,
954.0, 944.0, 924.0, 905.0, 886.0, 867.0, 884.0,
831.0, 813.0, 795.0, 778.0, 761.0, 745.0, 703.0,
643.0, 629.0, 601.0, 574.0, 549.0, 526.0, 504.0,
484.0, 452.0, 433.0, 420.0, 401.0, 380.0, 350.0,
320.0, 297.0, 275.0, 251.0, 238.0, 217.0, 190.0,
164.0, 150.0, 139.0, 130.0, 120.0, 106.0, 95.0,
84.0, 76.0, 71.0, 64.0, 61.0, 57.0, 54.0,
52.0, 48.0, 45.0, 42.0, 39.0, 36.5, 34.0,
32.0, 30.0, 28.0, 26.5);
4 1 0 DCL TEXT1 CHAR(60) INIT (' ');
5 1 0 DCL TEXT2 CHAR(60) INIT (' ');
6 1 0 GET FILE (SYS IN) EDIT (TEXT1,TEXT2)(COL(7),A(60),SAIP,
COL(7),A(60));
7 1 0 PUT FILE (SYS PRINT) EDIT (TEXT1,TEXT2) (SAIP(6),A(80),SAIP,
A(8));
8 1 0 DCL PROJ(0:731) FLOAT INIT
(
0.03326, 0.03418, 0.03396, 0.03351, 0.03279, 0.03174,
0.03047, 0.02886, 0.02717, 0.02531, 0.02323, 0.02092,
0.01843, 0.01583, 0.01310, 0.01050, 0.00771, 0.00482,
0.00188, -0.00103, -0.00384, -0.00659, -0.00931, -0.01201,
-0.01464, -0.01711, -0.01937, -0.02148, -0.02346, -0.02533,
-0.02703, -0.02849, -0.02969, -0.03066, -0.03147, -0.03210,
-0.03273, -0.03328, -0.03374, -0.03417, -0.03463, -0.03500,
-0.03538, -0.03574, -0.03609, -0.03646, -0.03681, -0.03701

```

STMT LEV NT

```

-0.01993,-0.01765,-0.01518,-0.01259,-0.00996,-0.00729, 00001100
-0.00854,-0.00618,0.00125,0.00417,0.00702,0.00979, 00001110
0.01252,0.01523,0.01787,0.02038,0.02268,0.02477, 00001120
0.02670,0.02849,0.03011,0.03148,0.03253,0.03329, 00001130
0.03383,0.03416); 00001140
9 1 0 DCL DEKL(0:73) FLOAT INIT 00001150
(-23.102,-22.644,-21.999,-21.176,-20.183,-19.034, 00001160
-17.738,-16.311,-14.766,-13.118,-11.382,-9.571, 00001170
-7.700,-5.782,-3.831,-1.861,0.114,2.084, 00001180
4.035,5.955,7.833,9.656,11.411,13.088, 00001190
14.676,16.163,17.519,18.792,19.913,20.892, 00001200
21.722,22.395,22.905,23.247,23.419,23.418, 00001210
23.246,22.905,22.397,21.728,20.905,19.935, 00001220
18.826,17.588,16.231,14.766,13.203,11.552, 00001230
9.825,6.033,6.186,4.298,2.579,0.840, 00001240
-1.508,-3.453,-5.381,-7.280,-9.137,-10.941, 00001250
-12.676,-14.331,-15.889,-17.336,-18.659,-19.845, 00001260
-20.881,-21.755,-22.455,-22.973,-23.302,-23.437, 00001270
-23.376,-23.120); 00001280
10 1 0 DCL ZGL(0:73) FLOAT INIT 00001290
(-0.0527,-0.0913,-0.1268,-0.1583,-0.1849,-0.2064, 00001300
-0.2224,-0.2329,-0.2378,-0.2371,-0.2312,-0.2208, 00001310
-0.2063,-0.1884,-0.1677,-0.1447,-0.1201,-0.0949, 00001320
-0.0694,-0.0452,-0.0220,-0.0006,0.0184,0.0345, 00001330
0.0471,0.0559,0.0609,0.0620,0.0593,0.0520, 00001340
0.0427,0.0297,0.0143,-0.0027,-0.0209,-0.0384, 00001350
-0.0558,-0.0791,-0.0885,-0.0961,-0.1034,-0.1068, 00001360
-0.1064,-0.1018,-0.0929,-0.0799,-0.0630,-0.0428, 00001370
-0.0197,0.0059,0.0335,0.0625,0.0922,0.1217, 00001380
0.1504,0.1776,0.2072,0.2250,0.2439,0.2569, 00001390
0.2684,0.2730,0.2722,0.2658,0.2534,0.2352, 00001400
0.2132,0.1822,0.1468,0.1120,0.0725,0.0314, 00001410
-0.0102,-0.0509); 00001420
11 1 0 DCL TAG FIXED (2) INIT (05); 00001430
12 1 0 DCL MONAT FIXED (2) INIT (08); 00001440
13 1 0 DCL JAHR DECIMAL FIXED (1) INIT (0); 00001450
14 1 0 DCL ZENITHDI FLOAT (16); 00001460
15 1 0 DCL ZEN FLOAT (16); 00001470
16 1 0 DCL SZEN FLOAT (16); 00001480
17 1 0 DCL (UHRZEIT,UHRZEIT1,UHRZEIT2,ZEITINTERVALL) FIXED (4,2); 00001490
18 1 0 DCL LAENGE FLOAT; 00001500
19 1 0 DCL LAENGERICHTUNG CHAR(8); 00001510
20 1 0 DCL LOKKOR FLOAT; 00001520
21 1 0 DCL KUZEN FIXED (7,4); 00001530
22 1 0 DCL KULMINATION FIXED (7,4); 00001540
23 1 0 DCL AUF FIXED (7,4); 00001550
24 1 0 DCL UNTER FIXED (7,4); 00001560
25 1 0 DCL NEIGUNGSWINKEL FLOAT (16); 00001570
26 1 0 DCL ZWINKEL FLOAT (16) INIT (45.0); 00001580
27 1 0 DCL CZWIN FLOAT (16) INIT (0.7071068); 00001590
28 1 0 DCL SZWIN FLOAT (16) INIT (0.7071068); 00001600
29 1 0 DCL ID CHAR(1); 00001610
30 1 0 DCL REF(165) FLOAT INIT ((165){0.00}); 00001620
31 1 0 DCL WTRANS(165) FLOAT INIT ((165){1.00}); 00001630
32 1 0 DCL BABS(165) FLOAT INIT ((165){0.00}); 00001640
33 1 0 DCL HORIZONT FLOAT INIT (90.0); 00001650
34 1 0 DCL HORPROZ FLOAT INIT (0.00); 00001660
35 1 0 DCL KUEVETTE CHAR(1) INIT ('N'); 00001670
36 1 0 DCL BLATT CHAR(1) INIT ('N'); 00001680
37 1 0 DCL HOEHEB FLOAT INIT (0.0); 00001690
38 1 0 DCL STRART CHAR(5); 00001700
39 1 0 DCL SPEKTRDATA CHAR (1) INIT ('J'); 00001710
40 1 0 DCL P(34) FLOAT INIT ((34){0.0}); 00001720
41 1 0 DCL T(34) FLOAT INIT ((34){0.0}); 00001730
42 1 0 DCL PH20(34) FLOAT INIT ((34){0.00}); 00001740
43 1 0 DCL P03(34) FLOAT INIT ((34){0.0}); 00001750
44 1 0 DCL H(34) FLOAT INIT (0.0,1.0,2.0,3.0,4.0,5.0,6.0,7.0,8.0, 00001760
9.0,10.0,11.0,12.0,13.0,14.0,15.0,16.0,17.0,18.0,19.0, 00001770
20.0,21.0,22.0,23.0,24.0,25.0,30.0,35.0,40.0,45.0,50.0, 00001780
70.0,100.0,100000.0); 00001790
45 1 0 DCL HAZE(34) FLOAT INIT 00001800
(2.830E+03,1.245E+03,5.374E+02,2.257E+02,1.193E+02, 00001810
8.992E+01,6.341E+01,5.893E+01,6.073E+01,5.822E+01, 00001820
5.679E+01,5.320E+01,5.589E+01,5.159E+01,5.052E+01, 00001830
4.747E+01,4.514E+01,4.460E+01,4.317E+01,3.616E+01, 00001840
2.669E+01,1.935E+01,1.456E+01,1.144E+01,8.831E+00, 00001850
7.434E+00,2.239E+00,5.893E-01,1.551E-01,4.084E-02, 00001860
1.078E-02,5.553E-05,1.970E-08,0.000); 00001870
46 1 0 DCL HAZE2(5) FLOAT INIT 00001880
(1.379E+04,5.034E+03,1.845E+03,6.735E+02,2.454E+02); 00001890
47 1 0 DCL LAMM FLOAT INIT (0.75); 00001900
48 1 0 DCL EH(6,34) FLOAT (16) INIT ((6*34){0.0}); 00001910
49 1 0 DCL T(6) FLOAT INIT ((6){0.0}); 00001920
50 1 0 DCL WPAT(5,34) FLOAT INIT ((5*34){0.00}); 00001930
51 1 0 DCL WPATHH(5,34) INIT ((34){0.00}); 00001940
52 1 0 DCL WPATZ(5,34) INIT ((34){0.00}); 00001950
53 1 0 DCL RAL(165) FLOAT INIT ((165){0.0}); 00001960
54 1 0 DCL OZON(1:127) FLOAT INIT 00001970
(4.75E+01,7.88E+01,1.18E+02,1.65E+02,2.16E+02,2.62E+02, 00001980
2.94E+02,3.02E+02,2.89E+02,2.56E+02,2.09E+02,1.57E+02, 00001990
1.03E+02,6.40E+01,3.62E+01,2.00E+01,1.05E+01,5.43E+00, 00002000
2.90E+00,1.48E+00,7.69E-01,3.92E-01,9.96E-01,9.76E-02, 00002010
4.46E-02,1.99E-02,9.20E-03,3.83E-03,1.38E-03, 00002020
(11){0.00}, 00002030
0.00E+00,1.00E-05,6.65E-04,1.43E-03,2.19E-03,2.90E-03, 00002040
3.19E-03,3.95E-03,6.83E-03,2.09E-02,9.9E-03,1.06E-02, 00002050
1.58E-02,1.89E-02,1.80E-02,2.09E-02,2.94E-02,3.81E-02, 00002060
3.87E-02,4.04E-02,4.66E-02,5.37E-02,6.23E-02,6.85E-02, 00002070
7.27E-02,7.75E-02,8.37E-02,9.15E-02,1.00E-01,1.08E-01, 00002080
1.15E-01,1.19E-01,1.17E-01,1.13E-01,1.11E-01,1.12E-01, 00002090
1.23E-01,1.25E-01,1.20E-01,1.06E-01,9.46E-02,7.81E-02, 00002100
6.47E-02,5.45E-02,4.43E-02,3.48E-02,2.74E-02,2.19E-02, 00002110
1.83E-02,1.47E-02,1.18E-02,1.09E-02,9.80E-03,7.26E-03, 00002120
(33){0.00}); 00002130
55 1 0 DCL H2O2(B6:165) FLOAT INIT 00002140
(-9.99,-1.46,-1.41,-1.82,0.16,0.00,-1.05,-2.96,-9.99, 00002150
-9.99,-3.02,-1.64,-1.38,-0.20,0.30,-0.12,-0.69,-2.39, 00002160
-5.00,-0.87,-2.45,-0.72,-0.26,0.27,0.16,1.28,1.56, 00002170
1.61,1.38,0.96,0.23,-0.83,-2.04,9.99,-9.99,-9.99, 00002180
0.19,1.89,1.37,-0.02,-2.81,-5.00,-1.84,0.31, 00002190
1.30,2.67,3.12,2.19,0.89,-2.58,-5.00,-1.83,-0.18, 00002200
0.60,2.21,3.43,3.17,2.18,0.63,-0.33,-0.63,-0.64, 00002210

```

STMT LEV NT

```

-0.23,-1.35,-0.23,0.58,1.28,1.71,2.62,3.82,4.49,
4.26,4.37,4.36,3.97,3.39,2.79,2.46,2.31);
56 1 0 DCL UMG(86;165) FLOAT INIT
      ((8)(-9.99),
      -0.11,-1.34,{32})(-9.99),
      -1.84,-1.62,-3.74,-2.93,-3.67,-4.95,-0.79,-3.04,-1.45,
      -1.04,-2.60,-4.97,-5.00,-5.00,-3.22,-1.90,-0.35,0.25,
      0.14,-1.27,-2.83,-4.10,-2.65,-3.18,-1.10,-3.40,-5.00,
      -3.43,-4.57,-2.91,1.63,2.80,2.44,2.30,0.34,-1.72,
      -2.12,-1.79);
57 1 0 DCL AERO(165) FLOAT INIT ((165){0.00});
58 1 0 DCL SAERO(165) FLOAT INIT ((165){0.00});
59 1 0 DCL TOZON(165) FLOAT INIT ((165){1.00});
60 1 0 DCL TH20(165) FLOAT INIT ((165){1.00});
61 1 0 DCL THMG(165) FLOAT INIT ((165){1.00});
62 1 0 DCL TRAL(165) FLOAT INIT ((165){1.00});
63 1 0 DCL TAERO(165) FLOAT INIT ((165){1.00});
64 1 0 DCL TTOT(165) FLOAT INIT ((165){1.00});
65 1 0 DCL FW(67) FLOAT INIT
      (-2.3468,-2.0362,-1.6990,-1.4815,-1.3279,-1.2007,
      -0.7825,-0.5229,-0.3468,-0.1938,-0.0655,0.0414,
      0.1553,0.2430,0.3324,0.4342,0.6128,0.7243,
      0.8261,0.9191,1.0000,1.0792,1.1461,1.2122,
      1.2672,1.3284,1.3892,1.4409,1.4955,1.5441,
      1.5946,1.6435,1.6857,1.7340,1.7782,1.8261,
      1.8692,1.9191,1.9638,2.0086,2.0607,2.1038,
      2.1461,2.1875,2.2304,2.2788,2.3263,2.3717,
      2.4183,2.4698,2.5159,2.5740,2.6284,2.6902,
      2.7559,2.8261,2.9081,3.0000,3.0607,3.1461,
      3.2041,3.2718,3.3054,3.3444,3.3979,3.4914,
      3.5682);
66 1 0 DCL TR(67) FLOAT INIT
      (0.999,0.998,0.996,0.994,0.992,0.990,0.980,0.970,
      0.960,0.950,0.940,0.930,0.920,0.910,0.900,0.880,
      0.860,0.840,0.820,0.800,0.780,0.760,0.740,0.720,
      0.700,0.680,0.660,0.640,0.620,0.600,0.580,0.560,
      0.540,0.520,0.500,0.480,0.460,0.440,0.420,0.400,
      0.380,0.360,0.340,0.320,0.300,0.280,0.260,0.240,
      0.220,0.200,0.180,0.160,0.140,0.120,0.100,0.080,
      0.060,0.040,0.030,0.020,0.015,0.010,0.008,0.006,
      0.004,0.002,0.001);
67 1 0 DCL TSF1(80;165) FLOAT INIT ((86){0.00});
68 1 0 DCL TSF2(80;165) FLOAT INIT ((86){0.00});
69 1 0 DCL HISOR(165) INIT ((165){0.00});
70 1 0 DCL HISOA(165) INIT ((165){0.00});
71 1 0 DCL HISOZ(165) INIT ((165){0.00});
72 1 0 DCL ZENITDISTANZ FIXED (7,4);
73 1 0 DCL SONNEHAZINUT FIXED (7,4);
74 1 0 DCL WISOLF FIXED (7,4);
75 1 0 DCL STREUW1 FLOAT INIT (0.0);
76 1 0 DCL STRAHLUNG(3) CHAR(8) INIT ('DIREKTE ','HIMMELS-','GLOBAL-');
77 1 0 DCL STRAHL(4;165) FLOAT INIT ((4*165){0.00});
78 1 0 DCL DISCO(94) FLOAT INIT ((94){0.00});
79 1 0 DCL SIR2(3) FLOAT INIT ((3){0.00});
80 1 0 DCL SUVA(3) FLOAT INIT ((3){0.00});
81 1 0 DCL SVIS(3) FLOAT INIT ((3){0.00});
82 1 0 DCL SQUANTE(3) FLOAT INIT ((3){0.00});
83 1 0 DCL SIR1(3) FLOAT INIT ((3){0.00});
84 1 0 DCL SIR2(3) FLOAT INIT ((3){0.00});
85 1 0 DCL STOT1(3) FLOAT INIT ((3){0.00});
86 1 0 DCL STOT2(3) FLOAT INIT ((3){0.00});
87 1 0 DCL UV(3) FLOAT INIT ((3){0.0});
88 1 0 DCL VIS(3) FLOAT INIT ((3){0.0});
89 1 0 DCL QUANTE(3) FLOAT INIT ((3){0.0});
90 1 0 DCL IR1(3) FLOAT INIT ((3){0.0});
91 1 0 DCL IR2(3) FLOAT INIT ((3){0.0});
92 1 0 DCL TOTAL(3) FLOAT INIT ((3){0.0});
93 1 0 DCL STATUS CHAR(4) INIT ('ENDE');
94 1 0 **UNTERPROGRAMM UMW1: UMWANDLUNG H.MIN IN DEZIMALSTELLEN**
95 1 0 PROC (STDKOM);
96 2 0 A = 1.00;
97 2 0 IF STDKOM < 0.0 THEN DO;
98 2 1 STDKOM = -STDKOM;
99 2 1 END;
100 2 0 DIFF = (STDKOM - FLOOR(STDKOM))/0.600;
101 2 0 STDKOM = (FLOOR(STDKOM) + DIFF) * A;
102 2 0 RETURN;
103 2 0 U99: END UMW1;
104 1 0 **UNTERPROGRAMM ADMIN: ADDITION VON H.MIN ZU H.MIN**
105 2 0 ADMIN: PROC (STDMIN);
106 2 0 DCL STDMIN FIXED (4,2);
107 2 0 DCL DIFF FIXED (4,2);
108 2 0 DIFF = STDMIN - FLOOR(STDMIN);
109 2 0 IF DIFF >= 0.60 THEN DIFF = 0.4 + DIFF;
110 2 0 STDMIN = (FLOOR(STDMIN) + DIFF);
111 2 0 RETURN;
112 1 0 U88: END ADMIN;
113 1 0 **UNTERPROGRAMM UMW2: UMWANDLUNG DEZIMALSTELLEN IN MIN**
114 2 0 UMW2: PROC (STDMIN);
115 2 0 DCL STDMIN FIXED (7,4);
116 2 0 A = 1.00;
117 2 1 IF STDMIN < 0.0 THEN DO;
118 2 1 STDMIN = -STDMIN;
119 2 1 A = -1.00;
120 2 1 END;
121 2 0 DIFF = (STDMIN - FLOOR(STDMIN)) * 0.600;
122 2 0 STDMIN = (FLOOR(STDMIN) + DIFF) * A;
123 2 0 RETURN;
124 2 0 U77: END UMW2;
125 1 0 **UNTERPROGRAMM VIA: ATMOSPHAERENWEG-BERECHNUNG**
126 2 0 VIA: PROC (W,ZD,SZD,CZD,M);
127 2 0 DCL W(5;34) FLOAT (0);
128 2 0 DCL ZD FLOAT (16);
129 2 0 DCL RE FLOAT (16);
130 2 0 DCL RV FLOAT (16);
131 2 0 DCL SZD FLOAT (16);
132 2 0 DCL SZ FLOAT (16);
133 2 0 DCL SPS1 FLOAT (16);
134 2 0 DCL CZD FLOAT (16);
135 2 0 DCL SPH1 FLOAT (16) INIT (0.00);
136 2 0 DCL CPH1 FLOAT (16) INIT (1.00);

```

STMT LEV NT

```

134 2 0 DCL SBET FLOAT (16); 00003340
135 2 0 DCL VWIN FLOAT (16); 00003350
136 2 0 DCL XR FLOAT (16); 00003360
137 2 0 RE = 6371.32; 00003370
138 2 0 IF SZD < 1.0E-10 THEN DO; 00003380
139 2 1 CZD = 1.00; 00003390
140 2 1 GO TO V26; 00003400
141 2 1 END; 00003410
142 2 0 SZ = SZD; 00003420
143 2 0 V22: RV = (RE + HOEHEB)/(RE + H(N+1)); 00003430
144 2 0 VER6 = TX(6)/EH(6,N+1); 00003440
145 2 0 THETA = 0.00; 00003450
146 2 0 DO I = N TO NL-1; 00003460
147 2 1 SP51 = RV * SZ; 00003470
148 2 1 THETA = THETA + (ASIN(SZ)/CA - ASIN(SP51)/CA); 00003480
149 2 1 SZ = VER6 * SP51; 00003490
150 2 1 IF SZ > 1.00 THEN SZ = SP51; 00003500
151 2 1 IF I = NL-1 THEN GO TO V20; 00003510
152 2 1 RV = (RE + H(I+1))/(RE + H(I+2)); 00003520
153 2 1 VER6 = EH(6,I+1)/EH(6,I+2); 00003530
154 2 1 V20: END; 00003540
155 2 0 ALPHA = THETA + ASIN(SZ)/CA; 00003550
156 2 0 REFR = ALPHA - ZD; 00003560
157 2 0 IF M = 2 THEN GO TO V23; 00003570
158 2 0 SZ = SIND(ZD - REFR); 00003580
159 2 0 M = 2; 00003590
160 2 0 GO TO V22; 00003600
161 2 0 V23: SZD = SZ; 00003610
162 2 0 CZD = SQRT(1.0 - SZD**2); 00003620
163 2 0 V26: DO I = NL TO M+1 BY -1; 00003630
164 2 1 H1 = H(I-1); 00003640
165 2 1 H2 = H(I); 00003650
166 2 1 IF I = M+1 THEN H1 = HOEHEB; 00003660
167 2 1 DS = H2 - H1; 00003670
168 2 1 IF SZD < 1.0E-10 THEN GO TO V36; 00003680
169 2 1 RV = (RE + H2)/(RE + H1); 00003690
170 2 1 SP51 = SZD * RV; 00003700
171 2 1 CP51 = SQRT(1.0 - SP51**2); 00003710
172 2 1 SBET = SP51 * CZD - CP51 * SZD; 00003720
173 2 1 XR = RE + H2; 00003730
174 2 1 VWIN = SBET/SP51; 00003740
175 2 1 DS = XR * VWIN; 00003750
176 2 1 V36: DO K = 1 TO 5; 00003760
177 2 2 EV = DS*EH(K,I-1); 00003770
178 2 2 IF EH(K,I-1) = 0.0 | EH(K,I) = 0.0 THEN GO TO V33; 00003780
179 2 2 IF EH(K,I-1) = EH(K,I) THEN GO TO V34; 00003790
180 2 2 EV = DS*(EH(K,I-1)-EH(K,I))/LOG(EH(K,I-1)/EH(K,I)); 00003800
181 2 2 GO TO V34; 00003810
182 2 2 V33: EV = 0; 00003820
183 2 2 V34: W(K,I-1) = W(K,I) + EV; 00003830
184 2 2 END; 00003840
185 2 1 IF SZD < 1.0E-10 THEN GO TO V35; 00003850
186 2 1 IF I = M+1 THEN GO TO V35; 00003860
187 2 1 IF I = M+2 THEN EH(6,I-2) = TX(6); 00003870
188 2 1 VER6 = EH(6,I-2)/EH(6,I-1); 00003880
189 2 1 SZD = SP51/VER6; 00003890
190 2 1 IF SP51 >= VER6 THEN SZD = SP51; 00003900
191 2 1 CZD = SQRT(1.0 - SZD**2); 00003910
192 2 1 V35: END; 00003920
193 2 0 ZD = ASIN(SP51)/CA; 00003930
194 2 0 SZD = SP51; 00003940
195 2 0 CZD = CP51; 00003950
196 2 0 RETURN; 00003960
197 2 0 V99: END VIA; 00003970
198 1 0 /**UNTERPR.TRANSORA: TRANSM.KOEFF. FUER OZON UND RAYLEIGHSTR.**/ 00003980
199 2 0 TRANSORA: PROC(ORA); 00003990
200 2 1 IF ORA < 1.0E-33 THEN DO; 00004000
201 2 1 ORA = 1.00; 00004010
202 2 1 RETURN; 00004020
203 2 1 END; 00004030
204 2 1 IF ORA < 0.1 THEN DO; 00004040
205 2 1 ORA = 1.0 - ORA + 0.5*ORA**2; 00004050
206 2 1 RETURN; 00004060
207 2 1 END; 00004070
208 2 1 IF ORA > 20.0 THEN ORA = 0.00; 00004080
209 2 1 ELSE ORA = EXP(-ORA); 00004090
210 2 1 RETURN; 00004100
211 1 0 T99: END TRANSORA; 00004110
212 2 0 /**UNTERPR.TRANSHUM: TRANSM.KOEFF. FUER WASSERDAMPF UND UMG **/ 00004120
213 2 0 TRANSHUM: PROC(TF,HUM); 00004130
214 2 1 DCL HUM FLOAT; 00004140
215 2 1 K1 = 1; 00004150
216 2 1 K2 = 39; 00004160
217 2 1 IF TF < -2.3468 THEN RETURN; 00004170
218 2 1 IF TF > 3.5682 THEN DO; 00004180
219 2 2 HUM = 0.00; 00004190
220 2 2 RETURN; 00004200
221 2 2 END; 00004210
222 2 1 IF TF > 2.00 THEN DO; 00004220
223 2 2 K1 = 40; 00004230
224 2 2 K2 = 67; 00004240
225 2 2 END; 00004250
226 2 1 DO K = K1 TO K2; 00004260
227 2 2 IF TF < FW(K) THEN GO TO T11; 00004270
228 2 2 END; 00004280
229 2 2 HUM = TR(K) + (TR(K-1)-TR(K))*((FW(K)-TF)/ 00004290
230 2 2 (FW(K)-FW(K-1))); 00004300
231 2 2 RETURN; 00004310
232 2 0 T999: END TRANSHUM; 00004320
233 1 0 /**BERECHNUNGEN EXTRATERR. SPEKTRUM UND SONNENDATEN **/ 00004330
234 1 0 GET SKIP; 00004340
235 1 0 GET FILE (SYSIN) DATA (TAG,MONAT,JAHR); 00004350
236 1 0 SCHJ = JAHR * 0.25; 00004360
237 1 0 IF MONAT = 0 & TAG = 0 THEN DO; 00004370
238 1 1 DEKLINEA = 5.187; 00004380
239 1 1 ZEITGLEI = -0.0550; 00004390
240 1 1 XTAG = 0; 00004400
241 1 1 NTAG = 0; 00004410
242 1 1 GO TO S1; 00004420
243 1 1 END; 00004430
244 1 0 MTAG = (MONAT - 1)*30; 00004440
245 1 0 LTAG2 = 0; 00004450

```

STMT LEV NT

```

242 1 0 IF MONAT >= 3 THEN LTAG2 = 2;
243 1 0 IF MONAT <= 7 THEN DO;
244 1 1 IF MONAT=2|MONAT=4|MONAT=6 THEN
      LTAG1 = MONAT/2;
      ELSE LTAG1 = (MONAT - 1)/2;
      END;
245 1 1
246 1 1
247 1 0 ELSE DO;
248 1 0 IF MONAT=9|MONAT=11 THEN LTAG1 = (MONAT + 1)/2;
249 1 1 ELSE LTAG1 = MONAT/2;
250 1 1 END;
251 1 0 MTAG = MTAG + LTAG1 - LTAG2;
252 1 0 XTAG = MTAG + TAG;
253 1 0 IF JAHR = 3 & XTAG > 60 THEN XTAG = XTAG + 1;
254 1 0 MTAG = FLOOR(XTAG/5.0);
255 1 0 IG = MTAG + 1;
256 1 0 IK = MTAG;
257 1 0 DTAG = XTAG - MTAG * 5.0;
258 1 0 IF DTAG < 0 THEN DO;
259 1 1 IG = MTAG;
260 1 1 IK = MTAG - 1;
261 1 1 DTAG = 5;
262 1 1 END;
263 1 0 IF XTAG = 366 THEN DO;
264 1 1 IG = 0;
265 1 1 IK = 0;
266 1 1 END;
267 1 0 PROZENT = PROZ(1K) + (PROZ(IG)-PROZ(1K)) * (DTAG - SCHJ) * 0.200;
268 1 0 DEKLINA = DEKL(1K) + (DEKL(IG)-DEKL(1K)) * (DTAG - SCHJ) * 0.200;
269 1 0 ZEITGLEI = ZGL(1K) + (ZGL(IG)-ZGL(1K)) * (DTAG - SCHJ) * 0.200;
270 1 0 DO I = 1 TO 165;
271 1 1 EXSO(I) = PROZENT * EXSO(I) + EXSO(I);
272 1 1 END;
273 1 0 S1: JAHR = JAHR + 1;
274 1 0 PUT FILE (SYSPRINT) EDIT ('DATUM: ', TAG, '.', MONAT, '.', JAHR,
      ' JAHR NACH SCHAFTJAHR', XTAG, ' TAG DES JAHRES',
      ' VARIATION DER SONNENEINSTRALUNG BEZ. MITTLEREN ERDE-SOMME',
      '-ABSTAND: ', PROZENT, ' PROZ./100',
      'DEKLINATION DER SONNE: ', DEKLINA, ' GRD',
      'ZEITGLEICHUNG: ', ZEITGLEI, ' H')(SKIP(6), A(7), X(13), F(2),
      A(1), X(2), F(2), A(1), X(2), F(1), A(22), SKIP, X(20), F(1),
      A(16), SKIP, X(20), A(58), A(10), F(8,5), A(10), SKIP, X(20),
      A(23), F(7,3), A(4), SKIP, X(20), A(15), F(7,4), A(2));
275 1 0 PUT SKIP (3);
276 1 0 KIKI = 0;
277 1 0 P1 = 3.14159265358979;
278 1 0 CA = P1/180.0;
279 1 0 KOKO = 0;
280 1 0 KUKU = 0;
281 1 0 GET SKIP;
282 1 0 GET FILE (SYSIN) DATA (ZENITHDI, SAZ, CAZ);
283 1 0 IF ZENITHDI >= 0.00 THEN DO;
284 1 1 CZEN = COSD(ZENITHDI);
285 1 1 SZEN = SIND(ZENITHDI);
286 1 1 KIKI = 1;
287 1 1 UHRZEIT1 = 0.00;
288 1 1 IUHR2 = 0;
289 1 1 PUT FILE (SYSPRINT) EDIT ('SONNENSTAND: ', ZENITDISTANZ: ',
      ZENITHDI, ' GRD', 'SINUS DES SONNENAZIMUTS: ', SAZ,
      'COSINUS DES SONNENAZIMUTS: ', CAZ)(A(13), X(7), A(14),
      F(1), X(2), X(4), SKIP, X(20), A(25), F(7,4), SKIP, X(20), A(27),
      F(7,4));
290 1 1 GET SKIP (3);
291 1 1 GO TO S4;
292 1 1 END;
293 1 0
294 1 0 GET FILE (SYSIN) DATA (UHRZEIT1, UHRZEIT2, ZEITINTERVALL);
295 1 0 GET SKIP;
296 1 0 GET FILE (SYSIN) DATA (GREENWICHDIFFERENZ);
297 1 0 GET SKIP;
298 1 0 GET FILE (SYSIN) DATA (LAENGE, LAENGENRICHTUNG, BREITE);
299 1 0 UZ1 = UHRZEIT1;
300 1 0 CALL UMM1 (UZ1);
301 1 0 UZ2 = UHRZEIT2;
302 1 0 CALL UMM1 (UZ2);
303 1 0 DT = ZEITINTERVALL;
304 1 0 CALL UMM1 (DT);
305 1 0 CALL UMM1 (GREENWICHDIFFERENZ);
306 1 0 CALL UMM1 (LAENGE);
307 1 0 CALL UMM1 (BREITE);
308 1 0 LOKKOR = LAENGE/15.0 - GREENWICHDIFFERENZ;
309 1 0 IF LAENGENRICHTUNG = 'WESTLICH' THEN LOKKOR = -LOKKOR;
310 1 0 KULMINATION = 12.00 - LOKKOR - ZEITGLEI;
311 1 0 KUZEN = ABS(BREITE - DEKLINA) * SIND(BREITE);
312 1 0 X2 = SIND(DEKLINA) * COSD(BREITE);
313 1 0 Y1 = SIND(DEKLINA) * COSD(BREITE);
314 1 0 Y2 = COSD(DEKLINA) * SIND(BREITE);
315 1 0 X3 = -X1/X2;
316 1 0 STUMIAUF = ACOS(X3)/(15.0 * CA);
317 1 0 AUFANG = -STUMIAUF + KULMINATION;
318 1 0 UTERGANG = STUMIAUF + KULMINATION;
319 1 0 IF UZ1 > 24.00 THEN DO;
320 1 1 STUM1 = 0.00;
321 1 1 IUHR2 = 0;
322 1 1 ZEITINTERVALL = 0.00;
323 1 1 PUT FILE (SYSPRINT) EDIT ('BERECHNUNG FUER KULMINATION ',
      '(UHRZEIT1 > 24.0):')(A(28), A(19));
324 1 1 PUT SKIP;
325 1 1 GO TO S3;
326 1 1 END;
327 1 0
328 1 0 IF UZ1 < AUFANG THEN DO;
329 1 1 KOKO = 1;
330 1 1 UHRZEIT1 = FLOOR(AUFANG);
331 1 1 UZ1 = UHRZEIT1;
332 1 1 DO WHILE (UZ1 < AUFANG);
333 1 2 UHRZEIT1 = UHRZEIT1 + ZEITINTERVALL;
334 1 2 CALL ADMIN(UHRZEIT1);
335 1 2 UZ1 = UHRZEIT1;
336 1 2 CALL UMM1(UZ1);
337 1 2 END;
338 1 1 DDTAUF = (UZ1 - AUFANG + DT) * 0.50;
339 1 1 HDTAUF = DDTAUF + 0.25;

```

STMT LEV NT

```

340 1 1      END;
341 1 0      IF UZ2 > UTERGANG THEN DO;
342 1 1          KUKU = 1;
343 1 1          UHRZEIT2 = CEIL(UTERGANG);
344 1 1          UZ2 = UHRZEIT2;
345 1 1          DO WHILE (UZ2 > UTERGANG);
346 1 2              DUHR = UHRZEIT2 - FLOOR(UHRZEIT2);
347 1 2              IF DUHR<ZEITINTERVALL THEN UHRZEIT2
                  =UHRZEIT2-ZEITINTERVALL-0.40;
348 1 2              ZEITINTERVALL;
349 1 2              UZ2 = UHRZEIT2;
350 1 2              CALL UMW1(UZ2);
351 1 2      END;
352 1 1      DDUNT = (UTERGANG - UZ2 + DT) * 0.50;
353 1 1      DDUNT = DDUNT + 0.25;
354 1 1      END;
355 1 0      WAHRZEITKORR = LOKKOR + ZEITGLEI - 12.00;
356 1 0      IF UHRZEIT1 = UHRZEIT2 THEN DO;
357 1 1          UHR2 = 0;
358 1 1          ZEITINTERVALL = 0.00;
359 1 1          GO TO S3;
360 1 1      END;
361 1 0      IUHR2 = FLOOR((UZ2 - UZ1)/DT + 0.0005);
362 1 0  S3:  CALL UMW2 (KULMINATION);
363 1 0      CALL UMW2 (KUZEN);
364 1 0      AUF = AUFGANG;
365 1 0      CALL UMW2 (AUF);
366 1 0      UNTER = UTERGANG;
367 1 0      CALL UMW2 (UNTER);
368 1 0      PUT FILE (SYSPRINT) EDIT ('BERECHNUNGSZEIT: ' 'ANFANG: ' '
          UHRZEIT1: ' H M ' 'ENDE: ' UHRZEIT2: ' H M ' 'INTERVALL: '
          ZEITINTERVALL: ' H M ')(A(17),X(3),A(8),P'99VB99',A(4),
          SKIP,X(20),A(6),P'99VB99',A(4),SKIP,X(20),A(11),
          P'99VB99',A(4));
369 1 0      PUT FILE (SYSPRINT) EDIT ('ORT: ' 'GEOGRAPHISCHE LAENGE: '
          LAENGE: ' GRD ' LAENGENRICHTUNG: 'GEOGRAPHISCHE BREITE: '
          BREITE: ' GRD ' LOCALE KORREKTUR: ' LOKKOR: ' H '
          'DIFFERENZ ZONENZEIT - GREENWICHZEIT: '
          GREENWICHDIFFERENZ: ' H ')(SKIP(3),A(5),X(15),A(22),F(6,2),
          A(5),A(8),SKIP,X(20),A(22),F(6,2),A(4),SKIP,X(20),A(18),
          F(5,2),A(2),SKIP,X(20),A(37),F(6,2),A(2));
370 1 0      PUT FILE (SYSPRINT) EDIT ('SONNENDATEN: ' 'AUFGANG: ' 'AUF,
          H M ' KULMINATION: ' KULMINATION: ' H M '
          'ZEITDISTANZ BEI KULMINATION: ' 'KUZEN: ' GRD MIN '
          'UTERGANG: ' UNTER: ' H M ')(SKIP(3),A(13),X(7),A(9),
          P'99VB99',A(4),SKIP,X(20),A(13),P'99VB99',A(4),SKIP,X(20),
          A(10),P'99VB99',A(8),SKIP,X(20),A(11),P'99VB99',A(4));
371 1 0  S4:  GET FILE (REFLGR) LIST (REFL);
372 1 0      GET FILE (REFLGR) EDIT (ID)(COL(80),A(1));
373 1 0  S6:  GET SKIP;
374 1 0      GET FILE (SYSIN) DATA (KUEVETTE,BLATT);
375 1 0      MU = 1;
376 1 0      IF KUEVETTE = 'J' THEN DO;
377 1 1          GET FILE (TRANSGR) EDIT (ID)(COL(80),A(1));
378 1 1          GET FILE (TRANSGR) LIST (WTRANS);
379 1 1      END;
380 1 0      IF BLATT = 'J' THEN DO;
381 1 1          GET FILE (ABSGR) EDIT (ID)(COL(80),A(1));
382 1 1          GET FILE (ABSGR) LIST (BABS);
383 1 1      END;
384 1 0      /**ATMOSPHAERENMODELL UND BER. DER AEQUIV. ABSORBERBETRAEGE**/
385 1 0      GET SKIP (1);
386 1 0      GET FILE (SYSIN) DATA (HOEHEB,SICHT);
387 1 0      GET SKIP;
388 1 0      PUT FILE (SYSPRINT) EDIT ('HOEHE DER EMPFAEGERFLAECHE '
          'UEBER NM: ' 'HOEHEB: ' KM ' 'BERECHNETE STRAHLUNGSART: '
          'STRAKT')(SKIP(3),A(28),A(10),F(5,3),A(3),SKIP,A(26),A(5));
389 1 0      NA = 1;
390 1 0      NB = 1;
391 1 0      IF SICHT = 23.0 THEN GO TO S10;
392 1 0      IF SICHT = 5.0 THEN DO;
393 1 1          DO I = 1 TO 5;
394 1 1              HAZE(I) = HAZE2(I);
395 1 2      END;
396 1 1          GO TO S10;
397 1 1      END;
398 1 0      DO I = 1 TO 5;
399 1 1          HAZE(I) = 6.389*((HAZE2(I)-HAZE(I))/SICHT + HAZE(I)/5.0
          - HAZE2(I)/23.0);
400 1 1      END;
401 1 1  S10:  NL = 34;
402 1 0      GET FILE (ATHOMOD) EDIT (ID)(COL(80),A(1));
403 1 0      GET FILE (ATHOMOD) LIST (P,T,PH20,P03);
404 1 0      C1 = 77.55 + 0.4351/LAMM**2;
405 1 0      C2 = 43.487 - 0.3473/LAMM**2;
406 1 0      DO I = 1 TO NL;
407 1 1          PS = P(I)/1013.0;
408 1 1          TS = 273.15/T(I);
409 1 1          Q1 = PS * TS;
410 1 1          Q2 = PS*SQRT(TS);
411 1 1          PRW = 0.1 * PH20(I);
412 1 1          PM = 4.56E-5*PRW*273.15/TS;
413 1 1          EH(1,I) = PRW*Q2**0.9;
414 1 1          EH(2,I) = Q1*Q2**0.75;
415 1 1          EH(3,I) = 46.699*P03(I);
416 1 1          EH(4,I) = Q1;
417 1 1          EH(5,I) = 3.5336E-4 * HAZE(I);
418 1 1          EH6 = 1.0E-6*(C1*Q1**1013.0/273.15 - PPW**C2);
419 1 1          IF I = NL THEN GO TO S12;
420 1 1          PPW# = 4.56E-6*PH20(I+1)/T(I+1);
421 1 1          EH6# = 1.0E-6*(C1*P(I+1)/T(I+1) - PPW#**C2);
422 1 1          EH(6,I) = 0.5 * (EH6 + EH6#);
423 1 1  S12:  IF I = NL THEN EH(6,I) = 0;
424 1 1          EH(6,I) = EH(6,I) + 1.0;
425 1 1      END;
426 1 0      DO I = 1 TO NL;
427 1 1          N = I;
428 1 1          IF HOEHEB - H(I) > 0 THEN GO TO S20;
429 1 1          IF HOEHEB - H(I) = 0 THEN GO TO S21;
430 1 1          N = I - 1;

```

STMT LEV MT

```

431 1 1 FAC = {MOEHEB - H(N)}/(H(1) - H(N));
432 1 1 P(L) = P(N)*(P(1)/P(N))**FAC;
433 1 1 TL = T(N)*(T(1)/T(N))**FAC;
434 1 1 WL = PH20(N)*(PH20(1)/PH20(N))**FAC;
435 1 1 TX61 = C1*PL1/TL1 - 4,56E-6*WL1*TL1**C2;
436 1 1 TX62 = C1*P(1)/T(1) - 4,56E-6*PH20(1)*T(1)**C2;
437 1 1 TX(6) = 0,5E-6*(TX62 + TX61);
438 1 1 DO K = 1 TO 5;
439 1 2 TX(K) = 0,0;
440 1 2 IF EH(K,N) <= 0,01*EH(K,N) > 1000,0 THEN GO TO S22;
441 1 2 TX(K) = EH(K,N)*(EH(K,1)/EH(K,N))**FAC;
442 1 2 S22:
443 1 1 GO TO S23;
444 1 1 S21:
445 1 2 DO K = 1 TO 5;
446 1 2 TX(K) = EH(K,1);
447 1 2 END;
448 1 1 S23:
449 1 1 TX(6) = TX(6) + 1,0;
450 1 1 GO TO S30;
451 1 1 S20:
452 1 0 END;
453 1 0 EH(N) = TX(N);
454 1 0 PUT FILE (SYSPRINT) EDIT ('DATEN ZUM ATMOSPHAERENMODELL ',
455 1 1 ('34 SCHICHTEN', 'NIVEAU', 'LUFTDRUCK', 'TEMPERATUR',
456 1 1 'WASSER-GEHALT', 'OZON-GEHALT', 'AEROSOL-DICHTE', 'KM'),
457 1 1 ('MBAR', 'K'), 'G/M3'), 'G/M3'),
458 1 1 ('ANZAHL/M3', 'PAGE,A(25),A(14),SKIP(3),X(1),A(6),X(7),A(9),
459 1 1 X(4),A(10),X(4),A(10),X(5),A(11),SKIP,X(2),A(4),
460 1 1 X(9),A(6),X(9),A(3),X(10),A(6),X(9),A(6),X(9),A(11));
461 1 1 PUT SKIP;
462 1 1 DO I = 1 TO NL;
463 1 1 PUT FILE (SYSPRINT) EDIT (H(1),P(1),T(1),PH20(1),POS(1),
464 1 1 MAZE(1))(SKIP,F(6,1),X(8),F(6,1),X(8),F(5,1),Z(X(7),
465 1 1 E(6,1),X(7),E(9,2)));
466 1 1 END;
467 1 0 PUT FILE (SYSPRINT) EDIT ('SICHTWEITE AUF MEERESHOEHE: ',
468 1 1 SICHT, 'KM')(SKIP(3),A(28),F(5,1),A(3));
469 1 0 PUT FILE (SYSPRINT) EDIT ('BEZEICHNUNGEN UND EINHEITEN DER ',
470 1 1 'AEQUIVALENTEN ABSORBERBETRAEGE: ', 'EH(1,N) BZW. W(1,N) FUER',
471 1 1 'WASSERDAMPF IN (G/CM2/KM) BZW. (G/CM2)', 'EH(2,N) BZW. ',
472 1 1 'W(2,N) FUER UNIFORMLY MIXED GASES IN (KM/KM) BZW. (KM)',
473 1 1 'EH(3,N) BZW. W(3,N) FUER OZON IN (CM ATM/STP/KM) UND ',
474 1 1 '(CM ATM)STP', 'EH(4,N) BZW. W(4,N) FUER MOLEKUELSTREUUNG',
475 1 1 'IN (KM/KM) BZW. (KM)', 'EH(5,N) BZW. W(5,N) FUER ',
476 1 1 'AEROSOLSTREUUNG IN (KM/KM) UND (KM)', 'EM: PRO KM ',
477 1 1 'ATMOSPHAERENWEG, W: UEBER ATMOSPHAERENWEG INTEGRIERT')
478 1 1 (SKIP(6),A(32),A(31),SKIP,X(28),A(24),A(39),SKIP,X(28),
479 1 1 A(13),A(54),SKIP,X(28),A(54),A(11),SKIP,X(28),A(41),A(21),
480 1 1 SKIP,X(28),A(25),A(35),SKIP(2),X(28),A(11),A(52));
481 1 0 PUT FILE (SYSPRINT) EDIT ('AEQUIVALENTE ABSORBERBETRAEGE PRO ',
482 1 1 'KM DES UNTERSTEN NIVEAUS (W=N, M=1)')(SKIP(3),A(34),A(28),
483 1 1 F(2),A(1));
484 1 0 PUT FILE (SYSPRINT) EDIT ('EH(1,N) = ', 'EH(1,N)', 'EH(2,N) = ',
485 1 1 'EH(2,N)', 'EH(3,N) = ', 'EH(3,N)', 'EH(4,N) = ', 'EH(4,N)',
486 1 1 'EH(5,N) = ', 'EH(5,N)')(SKIP,A(10),F(7,4),X(4),A(10),
487 1 1 F(6,4),X(4),A(10),F(6,4),X(4),A(10),F(6,4),X(4),A(10),
488 1 1 F(6,4),X(4));
489 1 0 GET FILE (AEROMO) EDIT (ID)(COL(80),A(1));
490 1 0 GET FILE (AEROMO) LIST (AERO,SAERO);
491 1 0 ZEN = ZENITHDI;
492 1 0 /**BERECHNUNGEN ZUR EMPFAENGERFLAECHE UND STREUSTRABLUNG**/
493 1 0 S7:
494 1 0 GET SKIP;
495 1 0 IF KIKI = 1 THEN DO;
496 1 1 ZENITHDI = ZEN;
497 1 1 CZEN = COSD(ZENITHDI);
498 1 1 SZEN = SIND(ZENITHDI);
499 1 1 END;
500 1 0 GET FILE (SYSIN) DATA (NEIGUNGSWINKEL,AZIMUT);
501 1 0 IF NEIGUNGSWINKEL = 0,0 THEN DO;
502 1 1 CNEIG = 1,0;
503 1 1 GO TO S6;
504 1 1 END;
505 1 0 SNEIG = SIND(NEIGUNGSWINKEL);
506 1 0 CNEIG = COSD(NEIGUNGSWINKEL);
507 1 0 ZWINKEL = NEIGUNGSWINKEL * 0,2 + 45,0;
508 1 0 CZWIN = COSD(ZWINKEL);
509 1 0 SZWIN = SIND(ZWINKEL);
510 1 0 GET SKIP;
511 1 0 GET FILE (SYSIN) DATA (HORIZONT,HORPROZ);
512 1 0 HORIZONT = 90,0 - HORIZONT;
513 1 0 HORPROZ = HORPROZ/100,0;
514 1 0 PUT FILE (SYSPRINT) EDIT ('EMPFAENGERFLAECHE: ',
515 1 1 'NEIGUNGSWINKEL: ', 'NEIGUNGSWINKEL', 'GRD', 'AZIMUT: ',
516 1 1 'AZIMUT', 'GRD', 'HORIZONT: ', 'HORIZONT', 'GRD',
517 1 1 'ABGEDeckTER TEIL DER HIMMELSHALBKUGEL: ', 'HORPROZ',
518 1 1 'PROZ./100')(PAGE,A(19),X(3),A(16),F(6,2),A(4),SKIP,
519 1 1 X(22),A(8),F(6,2),A(4),SKIP,X(22),A(10),F(5,2),A(4),
520 1 1 SKIP,X(22),A(39),F(5,3),A(10));
521 1 0 PUT FILE (SYSPRINT) EDIT ('REPRASENTATIVER NEIGUNGSWINKEL ',
522 1 1 'FUER DIE STREUSTRABLUNGSBERECHNUNG: ', 'ZWINKEL', 'GRD')
523 1 1 (SKIP(3),X(22),A(32),A(36),F(6,2),A(4));
524 1 0 IF STRART = 'HIST' THEN DO;
525 1 1 IWEIG = 2;
526 1 1 WPATHH(1,N) = 0,0;
527 1 1 CALL VFILE (WPATHH,ZWINKEL,SZWIN,CZWIN,IWEIG);
528 1 1 PUT FILE (SYSPRINT) EDIT ('ATMOSPHAERENWEG FUER DIE ',
529 1 1 'STREUSTRABLUNGSBERECHNUNG')(SKIP(3),X(22),A(25),
530 1 1 A(25));
531 1 0 PUT FILE (SYSPRINT) EDIT ('AEQUIVALENTE ABSORBER ',
532 1 1 'BETRAEGE DES ATMOSPHAERENWEGES: ', 'W(1,N) = ',
533 1 1 'WPATHH(1,N),W(2,N) = ', 'WPATHH(2,N),W(3,N) = ',
534 1 1 'WPATHH(3,N),W(4,N) = ', 'WPATHH(4,N),W(5,N) = ',
535 1 1 'WPATHH(5,N)')(SKIP,X(22),A(21),A(30),SKIP,X(22),
536 1 1 A(9),F(7,3),X(4),A(9),F(7,3),X(4),A(9),F(7,4),X(4),
537 1 1 A(9),F(7,3),X(4),A(9),F(7,3));
538 1 0 DO I = N TO NL-1;
539 1 1 WPATHH(1,I) = WPATHH(1,N)-WPATHH(1,I+1);
540 1 1 END;
541 1 0 NA = 1;
542 1 0 NB = 3;
543 1 0 IF STRART = 'HIST' THEN DO;
544 1 1 NA = 2;
545 1 1 NB = 2;

```

STMT LEV NT

```

500 1 2      END;                                00007820
501 1 1      PUT FILE (SYSPRINT) EDIT ('DIR. SONNEN- HIMMELS- UMD/ODER ' 00007830
502 1 0      'GLOBAL-STRAHLUNG AUF DIE EMPFAENGERFLAECH FUEER JEDEN ZEIT' 00007840
      'PUNKT DER BERECHNUNG UND' 'INTEGRATION DER GEWAELTEN' 00007850
      'STRAHLUNGSART VON UHRZEIT1 BIS UHRZEIT1')(SKIP(6),A(32), 00007860
      A(58),A(24),SKIP,A(26),A(39)); 00007870
503 1 0      PUT FILE (SYSPRINT) EDIT ('UHRZEIT: ' 'ZEITPUNKT DER BERECHNUNG' 'IN STD MIN' 00007880
      'S-ZENITDISTANZ: ' 00007890
      'ZENITDISTANZ DER SONNE BEI UHRZEIT (REFRAKTIONS KORRIGIERT)' 00007900
      'IN GRD MIN' 'S-AZIMUT: ' 00007910
      'AZIMUT DER SONNE BEI UHRZEIT (SUEDEEN = 0)' 00007920
      'IN GRD MIN' 'GAMMA: ' 'WINKEL ZWISCHEN DER RICHTUNG ZUR ' 00007930
      'SONNE UND DER NORMALEN ZUR EMPFAENGERFLAECH BEI UHRZEIT' 00007940
      'IN GRD MIN')(SKIP,3(SKIP,A(16),A(90),A(101),SKIP,A(16), 00007950
      A(33),A(57),A(10)); 00007960
504 1 0      PUT FILE (SYSPRINT) EDIT ('UV: ' 00007970
      'INTEGRIERTER WELLENLAENGENBEREICH: 300 NM - 400 NM' 00008000
      'IN W PRO M2 BZW. WM PRO M2 (INTEGR. STR.)' 'VIS: ' 00008010
      'IR1: ' 00008020
      'IR2: ' 00008030
      'IR3: ' 00008040
      'IR4: ' 00008050
      'IR5: ' 00008060
      'IR6: ' 00008070
      'IR7: ' 00008080
      'IR8: ' 00008090
      'IR9: ' 00008100
      'IR10: ' 00008110
      'IN MUMOL PRO M2 UND S BZW. MUMOL PRO M2 (INTEGR. STR.)' 00008120
505 1 0      PUT FILE (SYSPRINT) EDIT ('UHRZEIT: ' 'S-ZENIT- ' 'S-AZIMUT' 00008130
      'GAMMA: ' 'STRAHLUNGSART' 'UV' 'VIS' 'IR1' 'IR2' 'TOTAL' 00008140
      'QUANTEN' 'DISTANZ')(SKIP(4),A(7),X(2),A(8),X(2),A(8),X(4), 00008150
      A(5),X(4),A(13),X(5),A(2),X(9),A(3),X(8),A(3),X(8),A(3), 00008160
      X(7),A(5),X(5),A(7),SKIP,X(9),A(7)); 00008170
506 1 0      IF UZ1 > 24.00 THEN GO TO S28; 00008180
507 1 0      STUW1 = WAHRZEITKORR + UZ1; 00008190
508 1 0      IF STUW1 < 0.0 THEN STUW1 = 24.0 + STUW1; 00008200
509 1 0      STUW1 = STUW1 * 15.0; 00008210
510 1 0      S28: UV(*) = 0.0; 00008220
511 1 0      VIS(*) = 0.0; 00008230
512 1 0      QUANTEN(*) = 0.0; 00008240
513 1 0      IR1(*) = 0.0; 00008250
514 1 0      IR2(*) = 0.0; 00008260
515 1 0      TOTAL(*) = 0.0; 00008270
516 1 0      UHRZEIT = UHRZEIT1; 00008280
517 1 0      UZ = UZ1; 00008290
518 1 0      SDO1: **BERECHNUNG VON UHRZEIT1 BIS UHRZEIT2** 00008300
      **ZENITDISTANZ UND AZIMUT DER SONNE** 00008310
      IF KIK1 = 1 THEN GO TO S31; 00008320
      COSSTUW1 = COSD(STUW1); 00008330
      CZEN = X1 + X2 * COSSTUW1; 00008340
      SZEN = SORT(1.0 - CZEN**2); 00008350
      ZENITHDI = ACOS(CZEN)/CA; 00008360
      SAZ = COSD(DEKLINA) * SIND(STUW1)/SZEN; 00008370
      CAZ = (Y2 * COSSTUW1 - Y1)/SZEN; 00008380
      S31: AZ = ASIND(SAZ)/CA; 00008390
      IF SZEN < 1.0E-10 THEN GO TO S49; 00008400
      IF CAZ < 0.0 THEN AZ = 180.0 - AZ; 00008410
      IF AZ < 0.0 THEN AZ = 360.0 + AZ; 00008420
      S49: IWEO = 1; 00008430
      IF IUHR2 > 0 THEN GO TO S33; 00008440
      S33: CALL VIA (WPATH,ZENITHDI,SZEN,CZEN,IWEO); 00008450
      **WINKEL ZW. SONNENRICHTUNG UND EMPF. FLAECHEN NORMALE** 00008460
      IF NEIGUNGSWINKEL = 0.0 THEN DO: 00008470
      CGAMMA = CZEN; 00008480
      GAMMA = ZENITHDI; 00008490
      EW = 1.0; 00008500
      GO TO S32; 00008510
      END; 00008520
      CPS1 = COSD(AZ - AZIMUT); 00008530
      EW = CPS1 * 0.3; 00008540
      IF CPS1 < 0.0 THEN EW = 0.0; 00008550
      EW = NEIGUNGSWINKEL * EW/90.0 + 1.0; 00008560
      Z1 = CNEIG * CZEN; 00008570
      Z2 = SNEIG * SZEN; 00008580
      CGAMMA = Z1 + Z2 * CPS1; 00008590
      GAMMA = ACOS(CGAMMA)/CA; 00008600
      ZENITHDI = ZENITHDI; 00008610
      CALL UHMW2(ZENITHDI); 00008620
      SONNENAZIMUT = AZ; 00008630
      CALL UHMW2(SONNENAZIMUT); 00008640
      WISOFL = GAMMA; 00008650
      CALL UHMW2(WISOFL); 00008660
      PUT FILE (SYSPRINT) EDIT (UHRZEIT, ZENITDISTANZ, 00008670
      SONNENAZIMUT,WISOFL)(SKIP(2),X(1),P'99VB99',X(4),P'ZZVBZZ', 00008680
      (X(4),P'ZZVBZZ',X(4),P'ZZVBZZ'); 00008690
      **BESTIMMUNG DER STREUPHASEN ** 00008700
      IF STRART = 'HIST' | STRART = 'GLOST' THEN DO; 00008710
      HISOR(*) = 0.00; 00008720
      HISOA(*) = 0.00; 00008730
      HISOZ(*) = 0.00; 00008740
      RPOCS = 0.0950; 00008750
      IF GAMMA > 25.0 THEN DO; 00008760
      STREUW1 = GAMMA - 25.0; 00008770
      RPOCS = 0.0950 - 0.0254*STREUW1/55.0; 00008780
      IF STREUW1 > 55.0 THEN RPOCS = 0.0812; 00008790
      END; 00008800
      IF GAMMA > 80.0 THEN DO; 00008810
      APCOS = 0.0856 - (GAMMA-80.0)*0.0556/45.0; 00008820
      IF GAMMA > 125.0 THEN APCOS = 0.030; 00008830
      GO TO S34; 00008840
      END; 00008850
      APCOS = (105.0 - GAMMA)/20.0; 00008860
      APCOS = ATAND(APCOS)/600.0; 00008870
      S34: END; 00008880
      IF CGAMMA <= 0.00 | HORIZONT < ZENITHDI THEN IA = 1; 00008890
      ELSE IA = 0; 00008900
      **BER. DER STRAHLUNGSWERTE VON 220 - 3000 NM ** 00008910
574 1 1      SDO2: DO L = 1 TO 165; 00008920
      00008930

```

STMT LEV NT

```

    /**DIKRETE SONNENSTRAHLUNG**/
575 1 2 S1G2 = (1.0E+3 * LAMBDA(L))**(-1)**2; 00008940
576 1 2 S1G4 = S1G2 ** 2; 00008950
577 1 2 B1 = (.287,53+1.6693*S1G2+0.014523*S1G4)*1.0E-6 + 1.0; 00008960
578 1 2 B12 = (B1**2 - 1)** 2; 00008970
579 1 2 RAL(L) = 32.63931 * B12 * S1G4 * 1.0E+2; 00008980
580 1 2 IF L >= 120 THEN GO TO SA; 00008990
581 1 2 TOZON(L) = OZON(L) * WPATH(3,M); 00009000
582 1 2 CALL TRANSORA(TOZON(L)); 00009010
583 1 2 IF L <= 85 THEN GO TO SC; 00009020
584 1 2 SA: IF WPATH(1,M) < 1.0E-20 THEN GO TO SB; 00009030
585 1 2 IF H2O(L) = -9.99 THEN GO TO SB; 00009040
586 1 2 TSF1(L) = LOG10(WPATH(1,M)) + H2O(L); 00009050
587 1 2 CALL TRANSHUM(TSF1(L),TH2O(L)); 00009060
588 1 2 SB: IF WPATH(2,M) < 1.0E-20 THEN GO TO SC; 00009070
589 1 2 IF UMG(L) = -9.99 THEN GO TO SC; 00009080
590 1 2 TSF2(L) = LOG10(WPATH(2,M)) + UMG(L); 00009090
591 1 2 CALL TRANSHUM(TSF2(L),TUMG(L)); 00009100
592 1 2 SC: TRAL(L) = RAL(L) * WPATH(4,N); 00009120
593 1 2 CALL TRANSORA(TRAL(L)); 00009130
594 1 2 TAERO(L) = AERO(L) * WPATH(5,N); 00009140
595 1 2 CALL TRANSORA(TAERO(L)); 00009150
596 1 2 TTOT(L) = TOZON(L) * TH2O(L) * TUMG(L) * TRAL(L) * TAERO(L); 00009160
597 1 2 IF IA = 1 THEN DO: 00009170
598 1 3 STRAHL(1,L) = 0.00; 00009180
599 1 3 GO TO SD; 00009190
600 1 3 END; 00009200
601 1 2 SD: STRAHL(1,L) = EXSO(L) * TTOT(L) * CGAMMA; 00009210
602 1 2 IF STRAT = 'DIST' THEN GO TO SE; 00009220
603 1 2 /**HIMMELSSTRAHLUNG**/ 00009230
604 1 2 SHI: OSTOZON = 1.00; 00009240
605 1 2 OSTH2O = 1.00; 00009250
606 1 2 OSTUMG = 1.00; 00009260
607 1 2 USTOZON = 1.00; 00009270
608 1 2 USTH2O = 1.00; 00009280
609 1 2 USTUMG = 1.00; 00009290
610 1 2 DO I = NL TO M+1 BY -1; 00009300
611 1 3 IF L >= 120 THEN GO TO SAA; 00009310
612 1 3 OSTOZON = OZON(L)*(WPATH(3,1-1)*WPATH(3,1))/2.0; 00009320
613 1 3 CALL TRANSORA(OSTOZON); 00009330
614 1 3 USTOZON = OZON(L)*(WPATH(3,1-2)*WPATH(3,1-1))/2.0; 00009340
615 1 3 CALL TRANSORA(USTOZON); 00009350
616 1 3 IF L <= 85 THEN GO TO SCC; 00009370
617 1 3 SAA: WMH = (WPATH(1,1-1) + WPATH(1,1))/2.0; 00009380
618 1 3 IF WMH < 1.0E-20 THEN GO TO SAB; 00009390
619 1 3 IF H2O(L) < -9.99 THEN GO TO SAB; 00009400
620 1 3 STSF1 = LOG10(WMH) + H2O(L); 00009410
621 1 3 CALL TRANSHUM(STSF1,OSTH2O); 00009420
622 1 3 SAB: WMH = (WPATH(1,1-2) + WPATH(1,1-1))/2.0; 00009430
623 1 3 IF WMH < 1.0E-20 THEN GO TO SBB; 00009440
624 1 3 IF H2O(L) < -9.99 THEN GO TO SBB; 00009450
625 1 3 STSF1 = LOG10(WMH) + H2O(L); 00009460
626 1 3 CALL TRANSHUM(STSF1,USTH2O); 00009470
627 1 3 SBB: WMU = (WPATH(2,1-1) + WPATH(2,1))/2.0; 00009480
628 1 3 IF WMU < 1.0E-20 THEN GO TO SBC; 00009490
629 1 3 IF UMG(L) < -9.99 THEN GO TO SBC; 00009500
630 1 3 STSF2 = LOG10(WMU) + UMG(L); 00009510
631 1 3 CALL TRANSHUM(STSF2,OSTUMG); 00009520
632 1 3 SBC: WMU = (WPATH(2,1-2) + WPATH(2,1-1))/2.0; 00009530
633 1 3 IF WMU < 1.0E-20 THEN GO TO SCC; 00009540
634 1 3 IF UMG(L) < -9.99 THEN GO TO SCC; 00009550
635 1 3 STSF2 = LOG10(WMU) + UMG(L); 00009560
636 1 3 CALL TRANSHUM(STSF2,USTUMG); 00009570
637 1 3 SCC: OSTRAL = RAL(L)*(WPATH(4,1-1)*WPATH(4,1))/2.0; 00009580
638 1 3 CALL TRANSORA(OSTRAL); 00009590
639 1 3 USTRAL = RAL(L)*(WPATH(4,1-2)*WPATH(4,1-1))/2.0; 00009600
640 1 3 CALL TRANSORA(USTRAL); 00009610
641 1 3 OSTAERO = AERO(L)*(WPATH(5,1-1)*WPATH(5,1))/2.0; 00009620
642 1 3 CALL TRANSORA(OSTAERO); 00009630
643 1 3 USTAERO = AERO(L)*(WPATH(5,1-2)*WPATH(5,1-1))/2.0; 00009640
644 1 3 CALL TRANSORA(USTAERO); 00009650
645 1 3 OSTTOT = OSTOZON * OSTH2O * OSTUMG * OSTRAL * OSTAERO; 00009660
646 1 3 USTTOT = USTOZON * USTH2O * USTUMG * USTRAL * USTAERO; 00009670
647 1 3 ABSEX = EXSO(L) * OSTTOT * USTTOT; 00009680
648 1 3 RSIGNI = RAL(L)*(WPATH(4,1-1) - WPATH(4,1)); 00009690
649 1 3 ASIGNI = SAERO(L)*(WPATH(5,1-1) - WPATH(5,1)); 00009700
650 1 3 RSTSTR = ABSEX * RSIGNI * RPCOS; 00009710
651 1 3 ASTSTR = ABSEX * ASIGNI * APCOS; 00009720
652 1 3 SDA: HISOR(L) = HISOR(L) + RSTSTR; 00009730
653 1 3 HISOA(L) = HISOA(L) + ASTSTR; 00009740
654 1 3 END; 00009750
655 1 2 EXPO = -4.0 + 0.4 * ZENITHDI / 90.0; 00009760
656 1 2 FMULT = LOG(LAMBDA(L) * 0.01) * EXPO; 00009770
657 1 2 FMULT = EXP(FMULT) * 121.589 + 1.0; 00009780
658 1 2 HISOZ(L) = FMULT * (HISOR(L) + HISOA(L) * 1.0); 00009790
    /**REFLEKTIERTE STRAHLUNG**/
659 1 2 REF = REFL(L)*(STRAHL(4,L)*0.75+HISOZ(L)*PI*(1.0-HORPROZ)); 00009810
660 1 2 STRAHL(2,L) = HISOZ(L)*PI*(1.0+CNIEIG)/2.0*(1.0-HORPROZ)*EW; 00009820
661 1 2 REF = REF*(1.0+CNIEIG)/2.0 + REF*HORPROZ*(1.0+CNIEIG)/2.0; 00009830
    /**DIFFUSE STRAHLUNG**/
662 1 2 STRAHL(2,L) = STRAHL(2,L) + REF; 00009840
    /**GLOBALSTRAHLUNG**/
663 1 2 IF STRAT = 'GLOST' THEN STRAHL(3,L) = STRAHL(1,L) + 00009870
    STRAHL(2,L); 00009880
664 1 2 SE: END; 00009890
    /**INTEGRATION DER WELLENLAENGENBEREICHE UND BER. DER QUANTEN**/
665 1 1 S37: DO M = NA TO NB; 00009910
666 1 2 SUV1 = 0.0025 * STRAHL(M,1); 00009920
667 1 2 DO I = 2 TO 16; 00009930
668 1 3 SUV1 = SUV1 + 0.005 * STRAHL(M,I); 00009940
669 1 3 END; 00009950
670 1 2 SUV2 = 0.0025 * STRAHL(M,17); 00009960
671 1 2 SUVB = SUV1 + SUV2; 00009970
672 1 2 DO I = 18 TO 36; 00009980
673 1 3 SUV2 = SUV2 + 0.005 * STRAHL(M,I); 00009990
674 1 3 END; 00010000
675 1 2 SUV3 = 0.0025 * STRAHL(M,37); 00010010
676 1 2 SUVA(M) = SUV2 + SUV3; 00010020
677 1 2 SUVAB(M) = SUVA(M) + SUVB; 00010030
678 1 2 SVI3 = SUV3; 00010040
679 1 2 PHOFA = 8.35945 * 1.0E-3; 00010050

```

STMT LEV NT

```

680 1 2 SQUA1 = SUV3 * LAMBDA(37) * PHOFA; 00010660
681 1 2 DO I = 38 TO 78; 00010070
682 1 3 ADD = 0.005 * STRAHL(M,I); 00010080
683 1 3 SVIS1 = SVIS1 + ADD; 00010090
684 1 3 SQUA1 = SQUA1 + ADD * LAMBDA(1) * PHOFA; 00010100
685 1 3 END; 00010110
686 1 2 SVIS2 = 0.0075 * STRAHL(M,79); 00010120
687 1 2 SQUA2 = SVIS2 * LAMBDA(79) * PHOFA; 00010130
688 1 2 DO I = 80 TO 92; 00010140
689 1 3 ADD = 0.01 * STRAHL(M,I); 00010150
690 1 3 SVIS2 = SVIS2 + ADD; 00010160
691 1 3 IF I = 88 THEN SQUANTEN(M) = SQUA1 + SQUA2 * 0.5 * ADD * LAMBDA(1) * PHOFA; 00010170
692 1 3 SQUA2 = SQUA2 + ADD * LAMBDA(1) * PHOFA; 00010180
693 1 3 END; 00010190
694 1 3 SVIS3 = 0.005 * STRAHL(M,93); 00010200
695 1 2 SVIS3(M) = SVIS1 + SVIS2 + SVIS3; 00010210
696 1 2 SIR11 = SVIS3; 00010220
697 1 2 DO I = 94 TO 117; 00010230
698 1 3 SIR11 = SIR11 + 0.01 * STRAHL(M,I); 00010240
699 1 3 END; 00010250
700 1 2 SIR12 = 0.0175 * STRAHL(M,118); 00010260
701 1 2 DO I = 119 TO 131; 00010270
702 1 3 SIR12 = SIR12 + 0.025 * STRAHL(M,I); 00010280
703 1 3 END; 00010290
704 1 2 SIR13 = 0.0125 * STRAHL(M,132); 00010300
705 1 2 SIR1(M) = SIR11 + SIR12 + SIR13; 00010310
706 1 2 SIR21 = 0.025 * STRAHL(M,132); 00010320
707 1 2 DO I = 133 TO 164; 00010330
708 1 3 SIR21 = SIR21 + 0.05 * STRAHL(M,I); 00010340
709 1 3 END; 00010350
710 1 2 SIR22 = 0.025 * STRAHL(M,165); 00010360
711 1 2 SIR2(M) = SIR21 + SIR22; 00010370
712 1 2 STOT2(M) = SUVA(M) + SVIS(M) + SIR1(M) + SIR2(M); 00010380
713 1 2 STOT1(M) = SUVAB(M) + SVIS(M) + SIR1(M) + SIR2(M); 00010390
714 1 2 PUT FILE (SYSPRINT) EDIT (STRAHL(M,I),STR.,SUVA(M), 00010400
SVIS(M),SIR1(M),SIR2(M),STOT2(M),SQUANTEN(M))(SKIP, 00010410
X(40),A(8),A(4),X(2),5(F(8,2),X(3)),F(9,2)); 00010420
715 1 2 END; 00010430
716 1 1 /** ZEITL. INTEGRATION DER WELLENLAENGENBEREICHE**/ 00010440
717 1 1 IF UHR2 = 0 THEN GO TO S40; 00010450
718 1 1 DFAC = 1.00; 00010460
719 1 1 IF UHR1 = 0 THEN DO; 00010470
720 1 2 IF KOKO = 0 THEN DFAC = 0.50; 00010480
721 1 3 ELSE DO; 00010490
722 1 4 UV(MU) = SUVA(1)*DDTAUF + SUVA(2)*HDTAUF; 00010500
723 1 4 VIS(MU) = SVIS(1)*DDTAUF + SVIS(2)*HDTAUF; 00010510
724 1 4 IR1(MU) = SIR1(1)*DDTAUF + SIR1(2)*HDTAUF; 00010520
725 1 4 IR2(MU) = SIR2(1)*DDTAUF + SIR2(2)*HDTAUF; 00010530
726 1 4 TOTAL(MU) = STOT2(1)*DDTAUF+STOT2(2)*HDTAUF; 00010540
727 1 4 QUANTEN(MU) = SQUANTEN(1)*DDTAUF + 00010550
SQUANTEN(2)*HDTAUF; 00010560
728 1 3 GO TO S39; 00010570
729 1 3 END; 00010580
730 1 2 GO TO S38; 00010590
731 1 2 END; 00010600
732 1 1 IF UHR1 = UHR2 THEN DO; 00010610
733 1 2 IF KUKU = 0 THEN DFAC = 0.50; 00010620
734 1 3 ELSE DO; 00010630
735 1 4 UV(MU)=UV(MU)+SUVA(1)*DDTUNT+SUVA(2)*HDTUNT; 00010640
736 1 4 VIS(MU)=VIS(MU)+SVIS(1)*DDTUNT+SVIS(2)*HDTUNT; 00010650
737 1 4 IR1(MU)=IR1(MU)+SIR1(1)*DDTUNT+SIR1(2)*HDTUNT; 00010660
738 1 4 IR2(MU)=IR2(MU)+SIR2(1)*DDTUNT+SIR2(2)*HDTUNT; 00010670
739 1 4 TOTAL(MU)=TOTAL(MU)+STOT2(1)*DDTUNT+ 00010680
STOT2(2)*HDTUNT; 00010690
QUANTEN(MU)=QUANTEN(MU)+SQUANTEN(1)*DDTUNT+ 00010700
SQUANTEN(2)*HDTUNT; 00010710
740 1 3 GO TO S39; 00010720
741 1 3 END; 00010730
742 1 2 GO TO S38; 00010740
743 1 2 END; 00010750
744 1 1 S38: UV(MU) = UV(MU) + (SUVA(1) + SUVA(2)) * DT * DFAC; 00010760
745 1 1 VIS(MU) = VIS(MU) + (SVIS(1) + SVIS(2)) * DT * DFAC; 00010770
746 1 1 IR1(MU) = IR1(MU) + (SIR1(1) + SIR1(2)) * DT * DFAC; 00010780
747 1 1 IR2(MU) = IR2(MU) + (SIR2(1) + SIR2(2)) * DT * DFAC; 00010790
748 1 1 TOTAL(MU) = TOTAL(MU) + (STOT2(1) + STOT2(2)) * DT * DFAC; 00010800
749 1 1 QUANTEN(MU)=QUANTEN(MU)+(SQUANTEN(1)+SQUANTEN(2))*DT*DFAC*3600.0; 00010810
750 1 1 S39: PUT FILE (SYSPRINT) EDIT ('INTEGR. STR.',UV(MU),VIS(MU),IR1(MU), 00010820
IR2(MU),TOTAL(MU),QUANTEN(MU))(SKIP,X(40),A(12),X(2), 00010830
5(F(8,2),X(3)),E(10,3)); 00010840
751 1 1 S40: IF MU = 2 THEN GO TO S43; 00010850
752 1 1 IF MU = 3 THEN GO TO S44; 00010860
753 1 1 /**BER. DER TRANSMITTIERTEN UND ABSORBIERTEN STRAHLUNG **/ 00010870
754 1 1 IF KUEVETTE = 'J' THEN DO; 00010880
755 1 2 DO M = NA TO NB; 00010890
756 1 3 STRAHL(M,*) = WTRANS(*) * STRAHL(M,*); 00010900
757 1 2 END; 00010910
758 1 2 PUT FILE (SYSPRINT) EDIT ('VON KUEVETTEMWAND', 00010920
'DURCHGELASSENE STRAHLUNG')(SKIP,X(40), 00010930
A(1),A(25)); 00010940
759 1 2 MU = 2; 00010950
760 1 2 GO TO S37; 00010960
761 1 2 END; 00010970
762 1 1 S43: IF BLATT = 'J' THEN DO; 00010980
763 1 2 DO M = NA TO NB; 00010990
764 1 3 STRAHL(M,*) = BABS(*) * STRAHL(M,*); 00011000
765 1 2 END; 00011010
766 1 2 PUT FILE (SYSPRINT) EDIT ('VON BLATT ABSORBIERTE', 00011020
'STRAHLUNG')(SKIP,X(40),A(21),A(10)); 00011030
767 1 2 MU = 3; 00011040
768 1 2 GO TO S37; 00011050
769 1 2 END; 00011060
770 1 1 S44: MU = 1; 00011070
PUT FILE (SYSPRINT) EDIT ('AEGUIVALENTE ABSORBERBETRÄGE DES ', 00011080
'ATMOSPHÄRENWEGES IN RICHTUNG SONNE',W(1,N)=',WPATH(1,M), 00011090
'W(2,N)=',WPATH(2,N),W(3,N)=',WPATH(3,N),W(4,N)=', 00011100
WPATH(4,N),W(5,N)=',WPATH(5,N))(SKIP(2),X(40),A(34),A(35), 00011110
SKIP,X(40),A(7),F(7,3),X(2),A(7),F(7,3),X(2),A(7),F(7,4), 00011120
X(2),A(7),F(7,3),X(2),A(7),F(7,3)); 00011130
771 1 1 IF UHR2 = 0 THEN GO TO S45; 00011140
772 1 1 /**BER. DES NÄCHSTEN STUNDENWINKELS DER SONNE **/ 00011150
UHRZEIT = UHRZEIT + ZEITINTERVALL; 00011160

```

STMT LEV WT

```

773 1 1 CALL ADMIN(UHRZEIT); 00011180
774 1 1 UZ = UHRZEIT; 00011190
775 1 1 CALL UHM(UZ); 00011200
776 1 1 STUW1 = WAHRZEITKORR + UZ; 00011210
777 1 1 IF STUW1 < 0.00 THEN STUW1 = 24.0 + STUW1; 00011220
778 1 1 STUW1 = STUW1 * 15.0; 00011230
779 1 1 IF STUW1 >= 360.0 THEN STUW1 = STUW1 - 360.0; 00011240
780 1 1 S45: WPATH(*,*) = 0.0; 00011250
781 1 1 END; 00011260
782 1 0 GET SKIP; 00011270
783 1 0 GET FILE (SYSIN) DATA (STATUS); 00011280
784 1 0 IF STATUS = 'CONT' THEN GO TO S7; 00011290
785 1 0 IF UMR2 > 0 I SPEKTRDATA = 'H' THEN GO TO S99; 00011300
786 1 0 PUT FILE (SYSPRINT) EDIT (TEXT1,TEXT2)(PAGE,A(80),SKIP,A(80)); 00011310
787 1 0 PUT FILE (SYSPRINT) EDIT ('WELLEN-', 'EXTRATERM', 00011320
    'SPEKTRALE TRANSMISSIONSWERTE', 'BESTRAHLUNGSSTAERKE', 00011330
    'LAENGE', 'BESTRAHL.', '-', 'STAERKE', 'OZON', 'H2O', 'UMG' 00011340
    'RAL', 'STR.', 'TOTAL', 'D', 'ST', 'HIST', 'CLOST', 00011350
    (SKIP(3),A(7),X(3),A(10),X(26),A(28),X(34),A(19),SKIP, 00011360
    A(6),X(4),A(10),SKIP,X(11),A(7),X(7),A(4),X(10),A(3),X(10), 00011370
    A(3),X(7),A(8),X(5),A(8),X(7),A(5),X(9),Z(A(4),X(7)),A(5)); 00011380
    PUT FILE (SYSPRINT) EDIT ('(NM)', ' (W/M2/HUM)', ' (W/M2/HUM)') 00011390
    (SKIP,X(1),A(4),X(5),A(10),X(92),A(10)); 00011400
788 1 0 DO L = 1 TO 165; 00011410
789 1 0 PUT SKIP; 00011420
790 1 1 IF NB = 2 THEN DO; 00011430
791 1 1 PUT FILE (SYSPRINT) EDIT (LAMBDA(L),EXSO(L), ' '); 00011440
792 1 2 SKIP,2(F(6,1),X(5),X(86),A(1)); 00011450
793 1 2 GO TO S41; 00011460
794 1 2 END; 00011470
795 1 1 PUT FILE (SYSPRINT) EDIT (LAMBDA(L),EXSO(L),TOZON(L), 00011480
    TMOZ(L),TUMG(L),TRAL(L),TAERO(L), 00011490
    STRAHL(1,L))(SKIP,2(F(6,1),X(5),6(E(10,3),X(3)), 00011500
    X(2),F(7,2)); 00011510
796 1 1 IF NB = 1 THEN GO TO S42; 00011520
797 1 1 S41: PUT FILE (SYSPRINT) EDIT (STRAHL(2,L))(X(5),F(6,2)); 00011530
798 1 1 IF NB = 2 THEN GO TO S42; 00011540
799 1 1 PUT FILE (SYSPRINT) EDIT (STRAHL(3,L))(X(5),F(7,2)); 00011550
800 1 1 S42: END; 00011560
    /**MITTELUNG DER SPEKTRALEN WERTE ENTSPR. ISCO-MESSUNGEN **/ 00011570
801 1 0 PUT FILE (BOX) EDIT (TEXT1,TEXT2)(A(80),A(80)); 00011580
802 1 0 PUT FILE (BOX) SKIP(2); 00011590
803 1 0 K = 16; 00011600
804 1 0 DO I = 1 TO 25 BY 2; 00011610
805 1 1 DISCO(I) = 0.01*STRAHL(NB,K) + 0.08*STRAHL(NB,K+1) + 00011620
    K = K + 5; 0.01*STRAHL(NB,K+2); 00011630
806 1 1 K = K + 5; 00011640
807 1 1 END; 00011650
808 1 1 K = 19; 00011660
809 1 0 DO I = 2 TO 26 BY 2; 00011670
810 1 1 DISCO(I) = 0.05*STRAHL(NB,K) + 0.05*STRAHL(NB,K+1); 00011680
811 1 1 K = K + 5; 00011690
812 1 1 END; 00011700
813 1 0 DISCO(26) = 0.07*STRAHL(NB,79) + 0.03*STRAHL(NB,80); 00011710
814 1 0 K = 80; 00011720
815 1 0 DO I = 27 TO 35 BY 4; 00011730
816 1 1 DISCO(I) = 0.05*STRAHL(NB,K) + 0.05*STRAHL(NB,K+1); 00011740
817 1 1 K = K + 5; 00011750
818 1 1 END; 00011760
819 1 0 K = 81; 00011770
820 1 0 DO I = 28 TO 36 BY 4; 00011780
821 1 1 DISCO(I) = 0.03*STRAHL(NB,K) + 0.07*STRAHL(NB,K+1); 00011790
822 1 1 K = K + 5; 00011800
823 1 1 END; 00011810
824 1 0 K = 82; 00011820
825 1 0 DO I = 29 TO 37 BY 4; 00011830
826 1 1 DISCO(I) = 0.01*STRAHL(NB,K) + 0.08*STRAHL(NB,K+1) + 00011840
    0.01*STRAHL(NB,K+2); 00011850
827 1 1 K = K + 5; 00011860
828 1 1 END; 00011870
829 1 0 DISCO(30) = 0.07*STRAHL(NB,84) + 0.03*STRAHL(NB,85); 00011880
830 1 0 DISCO(34) = 0.07*STRAHL(NB,89) + 0.03*STRAHL(NB,90); 00011890
831 1 0 K = 94; 00011900
832 1 0 DO I = 38 TO 46 BY 2; 00011910
833 1 1 DISCO(I) = 0.01*STRAHL(NB,K) + 0.04*STRAHL(NB,K+1) + 00011920
    0.04*STRAHL(NB,K+2) + 0.01*STRAHL(NB,K+3); 00011930
834 1 1 K = K + 5; 00011940
835 1 1 END; 00011950
836 1 0 K = 97; 00011960
837 1 0 DO I = 39 TO 45 BY 2; 00011970
838 1 1 DISCO(I) = 0.03*STRAHL(NB,K) + 0.04*STRAHL(NB,K+1) + 00011980
    0.03*STRAHL(NB,K+2); 00011990
839 1 1 K = K + 5; 00012000
840 1 1 END; 00012010
841 1 0 DISCO(47) = 0.03*STRAHL(NB,117) + 0.07*STRAHL(NB,118); 00012020
842 1 0 K = 119; 00012030
843 1 0 DO I = 48 TO 94; 00012040
844 1 1 DISCO(I) = 0.1*STRAHL(NB,K); 00012050
845 1 1 K = K + 1; 00012060
846 1 1 END; 00012070
847 1 0 DO I = 1 TO 9; 00012080
848 1 1 PUT FILE (BOX) EDIT (DISCO(I), ' ')(F(5,1),A(2)); 00012090
849 1 1 END; 00012100
850 1 0 PUT FILE (BOX) SKIP(2); 00012110
851 1 0 DO I = 9 TO 37; 00012120
852 1 1 PUT FILE (BOX) EDIT (DISCO(I), ' ')(F(5,1),A(2)); 00012130
853 1 1 IF I=17 I=26 I=35 THEN PUT FILE (BOX) SKIP; 00012140
854 1 1 END; 00012150
855 1 0 PUT FILE (BOX) SKIP(2); 00012160
856 1 0 DO I = 37 TO 61; 00012170
857 1 1 PUT FILE (BOX) EDIT (DISCO(I), ' ')(F(5,1),A(2)); 00012180
858 1 1 IF I=45 I=54 THEN PUT FILE (BOX) SKIP; 00012190
859 1 1 END; 00012200
860 1 0 PUT FILE (BOX) SKIP(2); 00012210
861 1 0 DO I = 61 TO 94; 00012220
862 1 1 PUT FILE (BOX) EDIT (DISCO(I), ' ')(F(5,1),A(2)); 00012230
863 1 1 IF I=69 I=78 I=87 THEN PUT FILE (BOX) SKIP; 00012240
864 1 1 END; 00012250
865 1 0 PUT FILE (BOX) SKIP(2); 00012260
866 1 0 S99: END; 00012270

```


VII. LITERATURVERZEICHNIS

- Anderson, M.C. und Denmead, O.T.: Short wave radiation on inclined surfaces in model plant communities. *Agronomy Journal* 61, 867 - 872, 1969
- Arvesen, J.C., Griffin, R.N., Jr. und Pearson, B.D., Jr.: Determination of extraterrestrial solar spectral irradiance from a research aircraft. *Applied Optics* 8(11), 2215 - 2232, 1969
- Astronomical Almanac for the Year 1981, Her Majesty's Stationary Office and U.S. Government Printing Office, Washington 1980
- Broadfoot, A.L.: The solar spectrum 2100 - 3200 Å. *Astrophys. J.* 173, 681 - 689, 1972
- Coulson, K.L.: Solar and terrestrial radiation. Academic Press, New York 1975
- Deirmendjian, D. und Sekera, Z.: Global radiation from multiple scattering in a Rayleigh atmosphere. *Tellus* 6(4), 382 - 398, 1954
- Drummond, A.J.: On the measurement of sky radiation. *Arch. Met. Geoph. Biokl. B7*, 413 - 436, 1956
- Duncan, W.G.: Leaf angles, leaf area and canopy photosynthesis. *Crop Science* 11, 482 - 485, 1971
- Duncan, W.G., Loomis, R.S., Williams, W.A. und Hanau, R.: A model for simulating photosynthesis in plant communities. *Hilgardia* 33(4), 181-205, 1967
- Edlen, B.: The refractive index of air. *Metrologia* 2(2), 71 - 80, 1966
- Eller, B.M.: Energiebilanz und Blattemperatur. Diss. Juris, Zürich 1971

- Eller, B.M.: Messung spektraler Eigenschaften von Blättern im Felde. Verh. Schweiz. Natf. Ges. 152, 142 - 145, 1972
- Eller, B.M. und Koch W.: Globalstrahlung innerhalb und ausserhalb von Gaswechselkammern. Photosynthetica 11(3), 268-275, 1977
- Eller, B.M.: private Mitteilung, 1979a
- Eller, B.M.: Die strahlungsökologische Bedeutung von Epidermisaufgaben. Flora 168, 146-192, 1979b
- Eller, B.M., Willert, von D.J., Brinckmann, E. und Baasch, R.: Ecophysiological studies on *Welwitschia mirabilis* in the Namib desert. S. Afr. J. Bot. 2(3), 209 - 223, 1983
- Eller, B.M.: Variation of the optical properties during leaf development of *Ochna pulchra*. S. Afr. J. Bot. 3(2), 134 - 135, 1984
- Eller, B.M.: Epidermis und spektrale Eigenschaften pflanzlicher Oberflächen. Ber. Deutsch. Bot. Ges. 98, 465 - 475, 1985
- Gaastra, P.: Photosynthesis of crop plants as influenced by light, carbon dioxide, temperature, and stomatal diffusion resistance. Meded. Landbouwhogeschool Wageningen 59(13), 1-68, 1959
- Garcia de Cortazar, D., Acevedo, E. und Nobel, P.S.: Modeling of PAR interception and productivity by *Opuntia ficus-indica*. Agric. For. Meteorol. 34, 145 - 162, 1985
- Gates, D.M.: Spectral distribution of solar radiation at the earth's surface. Science 151, 523 - 529, 1966
- Gates, D.M.: Biophysical Ecology, Springer Verlag, New York 1980

- Hess, P.: Die spektrale Energieverteilung der Himmelsstrahlung. Gerlands Beitr. Geophys. 55, 204 - 220, 1939
- Kondratyev, K. Ya.: Radiation in the atmosphere. International Geophysics Series 12, Academic Press, New York 1969
- Kondratyev, K. Ya. und Fedorova, M.P.: Radiation regime of inclined surfaces. Sol. Energ. Proc. UNESCO, Geneva 1977, p. 36 - 61
- Kuroiwa, S.: Total photosynthesis of a foliage in relation to inclination of leaves. In: Setlik, I. (ed.): Prediction and measurement of photosynthetic productivity., 1970, p. 79 - 89
- Labs, D. und Neckel, H.: Transformation of the absolute solar radiation data into the international practical temperature scale of 1968. Solar Physics 15, 78 - 87, 1970
- Lang, A.R.G.: Leaf orientation of a cotton plant. Agric. Meteorol. 11, 37 - 51, 1973
- Lange, O.L. und Meyer, A.: Mittaglicher Stomatenschluss bei Aprikose (*Prunus armeniaca*) und Wein (*Vitis vinifera*) im Freiland trotz guter Wasserversorgung. Flora 168, 511-528, 1979
- Larcher, W.: Ökologie der Pflanzen, Eugen Ulmer Verlag, Stuttgart 1976
- Ledent, J.F.: Beam light interception by twisted leaf surfaces. Agric. Meteorol. 17, 271 - 280, 1976
- Ledent, J.F.: Beam light interception by leaves with undulating edges - A simulation of maize leaf sections. Agric. Meteorol. 19, 399 - 410, 1978
- Leeman, V., Earing, D., Vincent, R.K. und Ladd, S.: The NASA earth resources spectral information system. A

data compilation. Willow Run Laboratories, Institute of Science and Technology, The University of Michigan, Ann Arbor, MI, Report No. NASA CR-31650-24-T, May 1971

- List, R.J. (ed.): Smithsonian Meteorological Tables (6th rev. ed.). Smithsonian misc. Coll. Vol.114, Washington D.C. 1971
- McClatchey, R.A., Fenn, R.W., Selby, J.E.A., Volz, F.E. und Garing, J.S.: Optical properties of the atmosphere, AFCRL-71-0279, Env. Res. Pap. 354, 1971 (rev. ed.)
- McCree, K.J.: Light measurements in plant growth investigations. Nature 206, 527 - 528, 1965
- McMillen, G.G. und McClendon, J.H.: Leaf angle: an adaptive feature of sun and shade leaves. Bot. Gaz. 140(4), 437-442, 1979
- Mann, J.E., Curry, G.L. und Sharpe, P.J.H.: Light interception by isolated plants. Agric. Meteorol. 20, 205 - 214, 1979
- Monteith, J.L.: Light distribution and photosynthesis in field crops. Ann. Bot. 29, 17 - 37, 1965
- Neckel, H. und Labs, D.: The solar radiation between 3300 and 12500 Å. Solar Physics 90, 205 - 258, 1984
- Nilisk, H., Nilson, T. und Ross, J.: Radiation in plant canopies and its measurement. In: Setlik, I. (ed.): Prediction and measurement of photosynthetic productivity., 1970, p. 165 - 177
- Nobel, P.S.: Interception of photosynthetically active radiation by cacti of different morphology. Oecologia 45, 160 - 166, 1980
- Ondok, J.P.: Photosynthetically active radiation in a stand of *Phragmites communis* Trin. I. Distribution of irradiance and foliage structure. Photosynthetica 7(1), 8 - 17, 1973

- Penndorf, R.: Tables of the refractive index for standard air and the Rayleigh scattering coefficient for the spectral region between 0.2 and 20.0 μ and their application to atmospheric optics. J. Opt. Soc. Am. 47(2), 176 - 182, 1957
- Pierce, A.K. und Allen, R.G.: The solar spectrum between .3 and 10 μ m. In: White, O.R. (ed.): The solar output and its variation. Colorado Associated University Press, Boulder, Colorado 1977
- röhm GmbH: Prüfungsergebnisse PE 1.4-Spektrale Transmissionsgrade von farblosem und weiss eingefärbtem Plexiglas und von Plexidur. Röhm GmbH, Darmstadt 1971
- Ross, J.: Radiative Transfer in Plant Communities. In: Monteith, J.L. (ed.): Vegetation and the Atmosphere. Vol.1, Academic Press, London 1975
- Saeki, T.: Interrelationships between Leaf Amount, Light Distribution and Total Photosynthesis in a Plant Community. Bot. Mag. Tokyo 73, 55-63, 1960
- Seibert, B., Koch, W. und Eller, B.M.: Leaf Temperatures in a Gasexchange Chamber and in the Open Air. J. Exp. Bot. 31, 863-871, 1980
- Seibert, B.P.: Die Photosynthese von *Populus alba* L. und *Populus nigra* L. var. *italica* Duroi bei verschiedenen Blattstellungen und Konvektionsverhältnissen. Diss. Univ. Zürich 1984
- Selby, J.E.A. und McClatchey, R.A.: Atmospheric transmittance from 0.25 to 28.5 μ m: Computer code LOWTRAN 3, AFCRL-TR-75-0255, Env. Res. Pap. 513, 1975
- Selby, J.E.A., Shettle, E.P. und McClatchey, R.A.: Atmospheric transmittance from 0.25 μ m to 28.5 μ m: Supplement LOWTRAN 3B (1976). AFGL-TR-76-0258, Env. Res. Pap. 587, 1976

- Selby, J.E.A., Kneizys, F.X., Chetwynd, J.H. Jr., and McClatchey, R.A.: Atmospheric transmittance/radiance: Computer code LOWTRAN 4. AFGL-TR-78-0053, Env. Res. Pap. 626, 1978
- Smith, L.L., Krassner, J., Egan, W.G., Hilgeman, T.W. und Selby, J.E.A.: Recommended modification of LOWTRAN 4 to include first order solar scattering. In: Ludwig, C.B. (ed.): Atmospheric effects on radiative transfer. Proc. Soc. Photo-Opt. Instr. Eng. 195, 60 - 69, 1979
- Stanhill, G. und Fuchs, M.: The relative flux density of photosynthetically active radiation. J. Appl. Ecol. 14, 317 - 322, 1977
- Steven, M.D.: Standard distribution of clear sky radiance. Quart. J. R. Met. Soc. 103, 457 - 465, 1977
- Steven, M.D. und Unsworth, M.H.: The diffuse solar irradiance of slopes under cloudless skies. Quart. J. R. Met. Soc. 105, 593 - 602, 1979
- Szeicz, G.: Field measurements of energy in the 0.4 - 0.7 micron range II. In: Evans, G.C. et al. (eds.): Light as an ecological factor II, Oxford 1975, p. 513 - 519
- Tageeva, S.V. und Brandt, A.B.: Study of optical properties of leaves depending on the angle of light incidence. In: Christensen, B.C. (ed.): Progress of photobiology, Proc. 3rd Int. Congress on Photobiology, Elsevier, Amsterdam 1961, p. 163 - 169
- Tanner, V. und Eller, B.M.: Veränderungen der spektralen Eigenschaften der Blätter der Buche (*Fagus silvatica* L.) von Laubaustrieb bis Laubfall. Allg. Forst Jagd Zeitg. 157(6), 108 - 117, 1986
- Terjung, W.H. und Louie, S.S.: Potential solar radiation on plant shapes. Int. J. Biometeorol. 16, 25 - 43, 1972

- Thekaekara, M.P.: Extraterrestrial solar spectral irradiance. In: Drummond, A.J. und Thekaekara, M.P.: The extraterrestrial solar spectrum. Inst. Environ. Sci., Mount-Prospect, Illinois 1973, p. 71 - 133
- Thorpe, M.R., Saugier, B., Auger, S., Berger, A. und Methy, M.: Photosynthesis and transpiration of an isolated tree: model and validation. Plant, Cell and Environment 1, 269 - 277, 1978
- Varlet Grancher, C.: Variation et estimation de l'energie d'origine solaire recue sur des plans d'inclination et d'azimut variables. Ann. agron. 26(3), 245 - 264, 1975
- Weiss, A. und Norman, J.M.: Partitioning solar radiation into direct and diffuse visible and near-infrared components. Agric. For. Meteorol. 34, 205 - 213, 1985
- Willert, von D.J., Eller, B.M. und Brinckmann, E.: private Mitteilung, 1981
- Wolfe, W.L. und Zissis, G.L. (eds.): The Infrared Handbook. Office of Naval Research, Department of Navy, Washington D.C. 1978
- Woodhouse, R.M., Williams, J.G. und Nobel, P.S.: Leaf orientation, radiation interception, and nocturnal acidity increases by the CAM plant *Agave deserti* (Agavaceae). Amer. J. Bot. 67(8), 1179 - 1185, 1980

Curriculum vitae

Barbara Marie-Therese Flach von Basel
geboren am 12. Oktober 1952 in Basel

- 1959 - 1964 Primarschule in Basel
1964 - 1972 Gymnasium am Kohlenberg, Basel
1972 Maturität Typus B
1972 - 1978 Studium der Experimentalphysik mit den Nebenfächern theoretische Physik, Mathematik und Astronomie an der Universität Basel
8. 9. 1978 Diplom in Experimentalphysik
1974 - 1979 Wissenschaftliche Hilfsarbeiten am Astronomischen Institut der Universität Basel
1979 - 1986 ergänzende Studien in Botanik an den Universitäten Basel und Zürich
Assistentin am Institut für Pflanzenbiologie der Universität Zürich für ökophysiologische Kurse
Dissertation unter der Leitung von PD Dr. B. M. Eller und Prof. Dr. H. Wanner, seit Herbst 1985 Prof. Dr. Ph. Matile an Stelle von Prof. Dr. H. Wanner

Vorlesungen und Übungen wurden besucht bei:

Universität Basel: Prof. Dr. H. Zoller, Prof. Dr. J.J. Oertli

Universität Zürich: Prof. Dr. H. Wanner, PD Dr. B.M. Eller,
Prof. Dr. E. Thomas, Dr. F. Schanz,
Prof. Dr. D. Rast, Dr. W. Egger,
Dr. R. Honegger, PD Dr. T.W. Baumann,
PD Dr. A. Gigon

